



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TEPELNÉ ÚPRAVY POVRCHU PO 3D FDM TISKU

SURFACE HEAT TREATMENT AFTER 3D FDM PRINT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Břoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Lukáš Broušek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Tepelné úpravy povrchu po 3D FDM tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součástí práce je stavba 3D tiskárny (případně její dostupnost pro autora), například z rodiny reprop, její následné oživení a testy. Autor následně pro zvolený materiál navrhne experimentální část pro tepelnou úpravu povrchu tištěných výrobků. Hlavní pozornost bude zaměřena na změny drsnosti, mechanických a optických vlastností. Součástí práce je i doporučení technologických podmínek pro tepelnou úpravu povrchu dílů.

Cíle diplomové práce:

- rešerše problematiky
- výroba 3D FDM tiskárny
- návrh experimentu
- vyhodnocení experimentu
- doporučení vhodných technologických podmínek

Seznam literatury:

NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.

MOAVENI, Saeed. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008, xv, 861 s. Pearson education international. ISBN 978-0--3-241651-1.

LAWRENCE, Kent L. ANSYS workbench tutorial: structural. Mission: SDC Publications, 2012, 1 sv. (různé stránkování). Tickoo-CADCIM series. ISBN 978-1-58503-754-4.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, 322 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.

CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tématem diplomové práce jsou tepelné úpravy povrchu po 3D tisku metodou Fused Deposition Modeling (FDM). V úvodní části se nachází rešerše dané problematiky. Dále je zde popsána konstrukce a průběh stavby 3D tiskárny, na které budou vytisknuty vzorky pro experimenty v další části práce. Cílem je zjistit chování a změny struktur povrchů tepelně ovlivněných vzorků z různých materiálů. Dále pak vhodnost použitých metod a možnost jejich využití v praxi.

Klíčová slova

rapid prototyping, 3D tisk, fused deposition modeling, rerap, tepelná úprava povrchu

ABSTRACT

The topic of diploma thesis are surface heat treatments after 3D print by method Fused Deposition Modeling. In the introduction is located recherche of the given issue. Further, we describe the construction and process of the 3D printer construction, on which will be printed samples for experiments in the next part of the thesis. The aim is to determine the behavior and changes of surface structures of heat-affected samples from different materials. Furthermore, the suitability of the used methods and the possibility of their use in practice.

Key words

rapid prototyping, 3D print, fused deposition modeling, rerap, surface heat treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BŘOUŠEK, L. Tepelné úpravy povrchu po 3D FDM tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Tepelné úpravy povrchu po 3D FDM tisku vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Lukáš Břoušek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za ochotu, vstřícnost, spolupráci, odborné rady a připomínky a také za čas, který mi věnoval při vedení mé diplomové práce.

Rád bych také poděkoval mé rodině, která mi umožnila toto studium a všem, kteří mi byli při studiích oporou.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 RAPID PROTOTYPING	10
1.1 Postup při výrobě prototypu	10
1.2 Fused Deposition Modeling.....	11
1.3 Materiály vhodné pro FDM tisk	12
1.3.1 ABS (akrylonitril-butadien-styren)	13
1.3.2 PLA (polylactic acid)	14
1.3.3 PET (polyethyléntereftalát).....	14
1.3.4 PC (polycarbonate)	15
1.4 Struktura povrchu.....	16
1.5 Povrchová úprava	17
1.5.1 Broušení.....	17
1.5.2 Tryskání.....	17
1.5.3 Omílání.....	18
1.5.4 Napařování.....	18
1.5.5 Máčení.....	18
1.5.6 Lakování.....	19
1.5.7 Galvanické pokovování	19
2 Stavba FDM tiskárny	20
2.1 Reprap	20
2.2 Stavba tiskárny	21
2.2.1 Montáž rámu	21
2.2.2 Montáž os a dalších mechanických dílů	21
2.2.3 Elektronika.....	22
2.3 Zprovoznění tiskárny.....	24
2.4 První tisk	26
3 TEPELNÉ ÚPRAVY POVRCHU.....	29

3.1	Návrh experimentů.....	29
3.2	Zkoušené materiály.....	29
3.3	Objekty zkoušení	29
3.4	Etalony	30
3.5	Experiment 1	32
3.5.1	Vzorek A200.....	34
3.5.2	Vzorek A220.....	35
3.5.3	Vzorek A240.....	36
3.5.4	Vzorek B200.....	37
3.5.5	Vzorek B220.....	38
3.5.6	Vzorek B240.....	39
3.5.7	Výsledky experimentu 1	40
3.6	Experiment 2.....	41
3.6.1	Vzorek C180.....	43
3.6.2	Vzorek C190.....	44
3.6.3	Vzorek C200.....	45
3.6.4	Vzorek C210.....	46
3.6.5	Vzorek C220.....	47
3.6.6	Vzorek C230.....	48
3.6.7	Vzorek C240.....	49
3.6.8	Vzorek D180.....	50
3.6.9	Vzorek D190.....	51
3.6.10	Vzorek D200.....	52
3.6.11	Vzorek D210.....	53
3.6.12	Vzorek D220.....	54
3.6.13	Vzorek D230.....	55
3.6.14	Vzorek D240.....	56
3.6.15	Vzorek D250.....	57
3.6.16	Výsledky experimentu 2	58
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÝCH ZROJŮ	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65

ÚVOD

V současnosti, kdy jde vše rychle kupředu, se klade velký důraz na zkrácení času potřebného pro vývoj a také dosahování co nejefektivnější výroby. Oba aspekty splňuje soubor technologií nesoucí označení rapid prototyping. Technologie umožňují pomocí softwarových a hardwarových nástrojů rychlou přeměnu ideje do hmotné podoby. Výběr vhodné metody pro výrobu prototypu probíhá na základě na něj kladených požadavků a typu použitého materiálu pro jeho zhotovení.

Jednou z technologií je také Fused Deposition Modeling. Metoda využívá pro tisk termoplastických materiálů, které budou zkoumány v této práci. Princip tisku je vcelku jednoduchý, a proto nachází uplatnění nejen v průmyslu, ale také v domácnostech. O další přiblížení této technologie lidem se zasloužil komunitní projekt Reprap. Lidé zde vyvinuli a dále rozvíjejí sebe reprodukcující 3D tiskárny včetně potřebného softwaru s otevřeným zdrojovým kódem. Každý si tak může složit svoji tiskárnu za zlomek ceny profesionálních zařízení.

Za úskalí technologie 3D tisku metodou FDM lze považovat schodovitá struktura povrchu vytištěného objektu. Tu lze do jisté míry ovlivnit úpravou parametrů tisku, nikdy ale není možno dosáhnout krásně hladkého povrchu. Pro jeho dosažení je využíváno několika technik, ať již mechanickou nebo chemickou cestou. Zaměření zde bude na tepelné úpravy povrchu s využitím nízkých teplot tání materiálů v porovnání s běžnými konstrukčními materiály. Cílem práce bude zjistit, zda navržené metody tepelného opracování použité v experimentech povedou k požadovaným změnám struktur povrchu a zda můžou nalézt uplatnění v běžné praxi.

1 RAPID PROTOTYPING

Slovní spojení rapid prototyping lze z angličtiny volně přeložit jako rychlá výroba prototypu. Jedná se tedy o množinu technologií, které vznikly za účelem rychlé přeměny ideje ke zhotovení fyzického trojrozměrného modelu. Výroba prototypů probíhá inverzním způsobem, než jsme zvyklí u klasických metod výroby, jako je například soustružení nebo frézování. Model je tvořen tzv. aditivním způsobem. To znamená, že postupným přidáváním materiálu docílíme k vytvoření požadovaného tvaru [1].

Tato technologie je relativně nová. Její počátky se datují do roku 1983, kdy byla veřejnosti představena první z metod pojmenovaná Stereolitografie, jejímž vynálezcem byl Charles (Chuck) Hull. V roce 1986 si nechal nápad patentovat a ve stejném roce spoluzaložil společnost 3D Systems, která se tak stala první firmou zabývající se 3D tiskem na světě. Pojem rapid prototyping se tak dostal do povědomí a postupem času byly vynalézány další metody 3D tisku [2].

V současné době je na trhu značné množství zařízení i materiálů, a proto zájem i rozsah aplikací nadále narůstá. Technologie splňuje požadavky moderní doby. Výrazně zkracuje dobu vývoje produktu, čímž šetří náklady a také umožňuje vytvořit nespočet variant produktů, a tak se více přiblížit představám zákazníka. Prototypy můžou posloužit k různým účelům. Lze si jimi ověřit vhodnost geometrie a možnost bezproblémové montáže, mohou posloužit pro testování vhodnosti tvaru například při obtékání vzduchem nebo jen pro lepší vizualizaci a možnost osahání si repliky výrobku zákazníkem [1, 3].

1.1 Postup při výrobě prototypu

Výroba prototypů se běžně rozděluje na tři bloky činností. Ten první se nazývá pre-processing. Zde je za úkol získat a připravit data. První z možností je vytvořit model v některém z programů pro podporu projektování. Navrhnutý tvar musíme následně převést do vhodného formátu. Tím dojde k aproximaci křivosti povrchu modelu na malé trojúhelníky, kde každý je definován normálovým vektorem a třemi body reprezentující vrcholy. Druhou a složitější variantou je využití reverzního inženýrství. Výstupem reverzního inženýrství je získání dat ze skutečné součásti. Použitím vhodného hardwarového a softwarového nástroje součást naskenujeme, čímž získáme mrak bodů. Z něj se vytvoří trojúhelníková síť polygonů, která je pak navíc vyhlazena [1, 4].

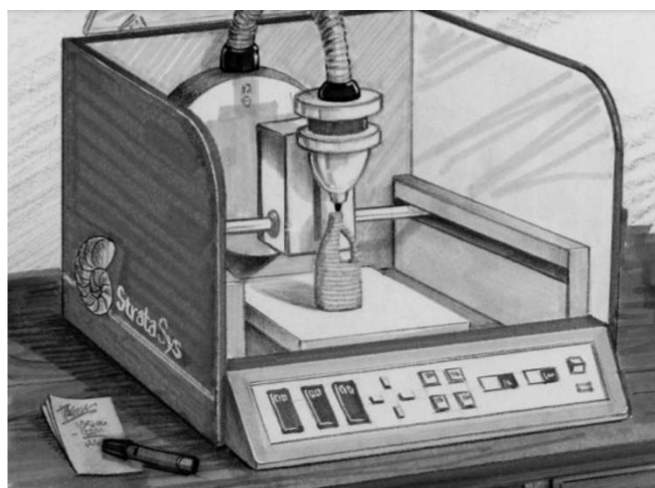
Takto připravená data je třeba upravit. Využitím dalšího softwarového nástroje, kterému poskytneme informace o typu a parametrech výrobního zařízení, požadavcích na provedení a kvalitu tisku, rychlosti výroby a dalších individuálních požadavcích, jsme schopni vygenerovat takzvaný g-kód [3].

Další etapa je nazývána production neboli výroba. G-kód vygenerovaný během předešlých kroků je využit výrobními zařízeními pro vytvoření fyzického modelu. Zde může výroba prototypu skončit. Pokud však máme dodatečné požadavky například na kvalitu nebo vzhled povrchu, je zapotřebí provést další úkony [4].

Třetím a posledním stádiem výroby prototypu je takzvaný post-processing. Za tímto termínem jsou skryty všechny úkony potřebné k dosažení požadovaných vlastností vzorků po výrobě. Může to být odstranění podpor potřebných pro tisk převislých částí modelu. Spadají sem také operace spojené s vyhlazením zdrsňeného povrchu nebo vytvrzení součástí [4].

1.2 Fused Deposition Modeling

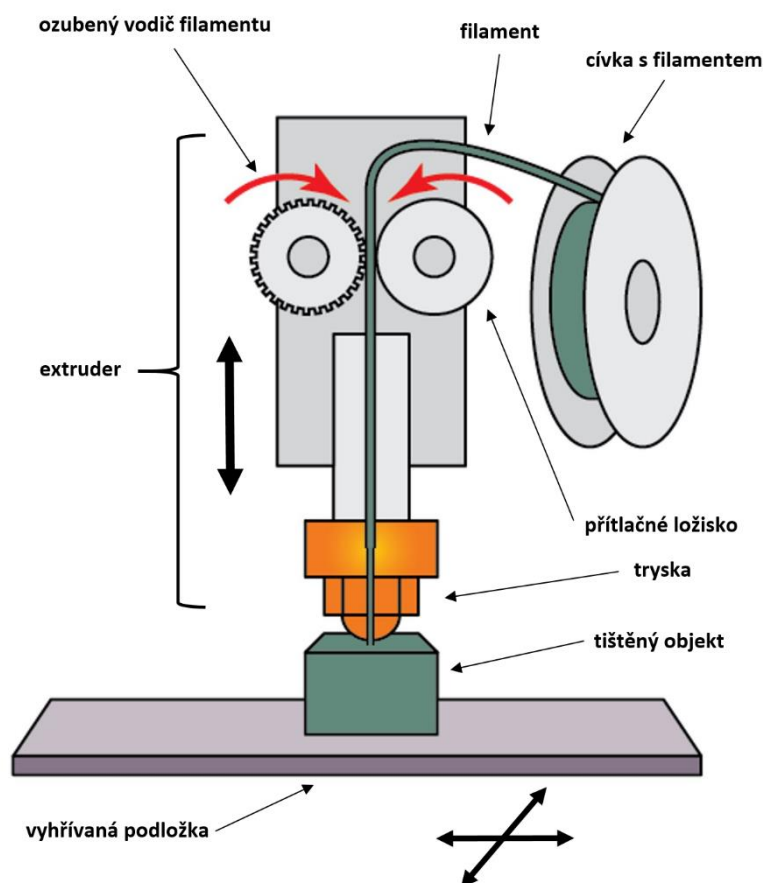
Vynálezcem této technologie se stal roku 1988 Scott Crump. Tomu se podařilo pomocí tavné lepící pistole vyrobit hračku pro svou dceru z vosku a polyetylenu. Postupně svůj nápad vylepšoval až v roce 1991 založil firmu Stratasys, Ltd. a vyrobil první prototypy FDM tiskáren. Jeden z nich je zobrazen na obrázku 1-1 [5].



Obr. 1-1 FDM tiskárna Stratasys [5].

Principem je, jak již předklad napovídá, postupné nanášení roztaveného materiálu. Tisková hlava se pohybuje v rovině xy, nanáší materiál na podložku a po vytvoření požadovaného tvaru se posune v ose z o výšku vrstvy vzhůru. Tento proces se neustále opakuje, dokud nedojde k vytvoření všech vrstev, a tedy vytištění modelu. Materiál je do tiskové hlavy přiváděn ozubeným podávacím kolečkem z cívky ve formě tenkého drátu. Kolečko dále vtlačí filament do extruderu. V něm dochází k ohřevu filamentu a materiál začíná téct. Poté je tryskou umístěn na požadované místo. Délka výroby závisí na složitosti modelu a na zvolených parametrech tisku. Obvykle se pohybuje v řádu jednotek až desítek hodin [1, 3, 6].

FDM technologie spadá do kategorie běžně komerčně využívaných metod 3D tisku. Pořízení tiskového zařízení nevyžaduje příliš velké investice. Také provoz nevykazuje přílišnou hlučnost a je netoxický. To jsou důvody, proč je hojně využíván také v domácnostech. Pro tisk lze vybrat z různých druhů materiálu. Tiskem navíc vytváříme jen minimální odpad. Vyrobené modely jsou pevné, a proto mohou být využity i jako funkční prototypy. Za nedostatky lze považovat omezenou přesnost tisku. Vytisknuté díly mají navíc v různých směrech odlišné mechanické vlastnosti a jsou náchylné ke smrštění. Princip FDM tisku je znázorněn na obrázku 1-2 [6, 7].



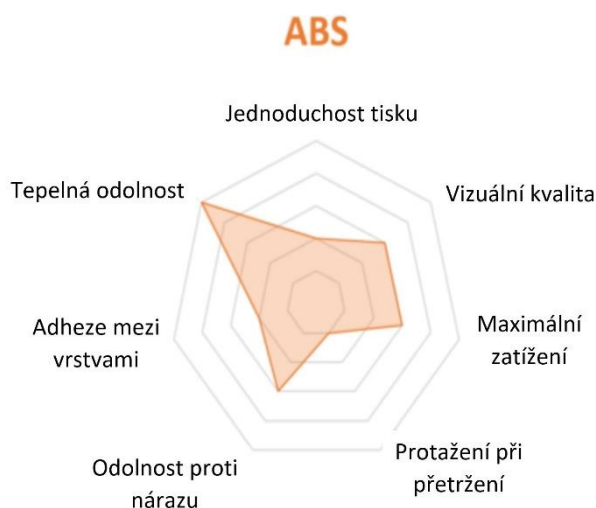
Obr. 1-2 Schéma FDM tisku [8].

1.3 Materiály vhodné pro FDM tisk

Pro tisk technologií FDM lze využít celou řadu materiálů. Volba závisí na požadovaných vlastnostech a následném využití vytisknutého objektu. Níže jsou popsány ty nejběžnější. Na obrázcích 1-3 až 1-6 jsou graficky shrnuty charakteristické vlastnosti popisovaných materiálů.

1.3.1 ABS (akrylonitril-butadien-styren)

ABS je nejpoužívanější materiál pro FDM tisk. Jedná se o amorfní termoplastický kopolymer, který se vyznačuje svojí tuhostí, houževnatostí a odolností vůči mechanickému poškození. Odolává nízkým i vysokým teplotám a lze jej snadno opracovávat. To jej předurčuje jako vhodný materiál pro výrobu funkčních prototypů. ABS je senzitivní vůči UV záření, proto není vhodný pro objekty vystavené slunečnímu záření [9, 10, 11, 12].



Obr. 1-3 Vlastnosti ABS [12].

ABS termoplastu existuje několik variant, které mají modifikované určité vlastnosti, aby splňovaly požadavky pro specifické použití [11]:

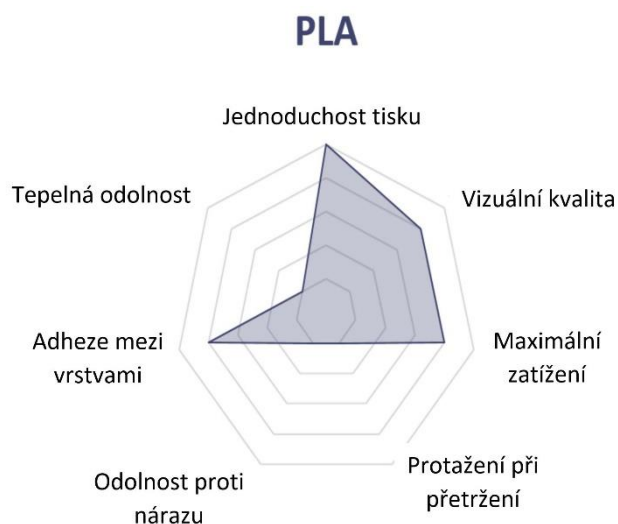
- ABS+ je o 40 % pevnější, než klasický ABS. Navíc není tak náchylný na teplotu prostředí při tisku.
- ABSi umožňuje tisk průsvitných objektů. Ty mohou mít jak estetické, tak funkční využití. Splňuje také požadavky biokompatibility a může být použit i pro lékařské účely.
- ABS – ESD7 je elektricky disipativní. Uplatnění nalézá při výrobě elektronických součástí a zařízení s rizikem poškození statickým nábojem.
- ABS – M30 je pevnější než ABS. Je vhodný pro tisk objektů s vyššími nároky na mechanické zatížení.
- ABS – M30i je stejně jako ABSi biokompatibilní termoplast. Využívá se pro lékařské, farmaceutické a potravinářské účely.

1.3.2 PLA (polylactic acid)

Tento termoplastický polyester je získáván z obnovitelných zdrojů, například z kukuřičného nebo bramborového škrobu a je tedy biologicky odbouratelný. Mechanické vlastnosti má srovnatelné s ostatními termoplasty. Snadno se tiskne a je vhodný i pro tisk velkých objektů. Z důvodu pohlcování vlhkosti materiálem je nutno zajistit suché prostředí pro tisk i skladování. V porovnání s ABS je méně odolný vůči vyšším teplotám. PLA je rezistentní vůči UV záření, což umožňuje jeho použití i ve venkovním prostředí. Vytisknutý díl lze upravovat běžnými metodami mimo broušení. To lze provádět jen za předpokladu, že zajistíme, aby nebyla překročena teplota, při níž materiál začíná měknout. Hrozilo by zde riziko deformace tvaru výtisku [11, 12].

Varianty PLA [11]:

- PLA – D se vyznačuje vyšší tvrdostí oproti běžnému PLA.
- Steel PLA se využívá například pro výrobu šperků, figurek nebo rekvizit. Vytisknutý objekt se dá leštit, čímž se získá podobný povrch, jako by byl výrobek zhotoven z oceli.



Obr. 1-4 Vlastnosti PLA [12].

1.3.3 PET (polyethyléntereftalát)

Tento polyester je lidstvu dobře znám, protože je hojně využíván jako obal pro nápoje nebo materiál pro výrobu vláken a fólií. V 3D tisku má menší uplatnění, v porovnání s předešlými materiály. PET je materiál pevný, houževnatý a rozměrově stabilní do 100 °C. V původním stavu je bezbarvý, při změně teploty dochází ke změnám jeho transparentnosti [9].

Také PET má své modifikované verze [11]:

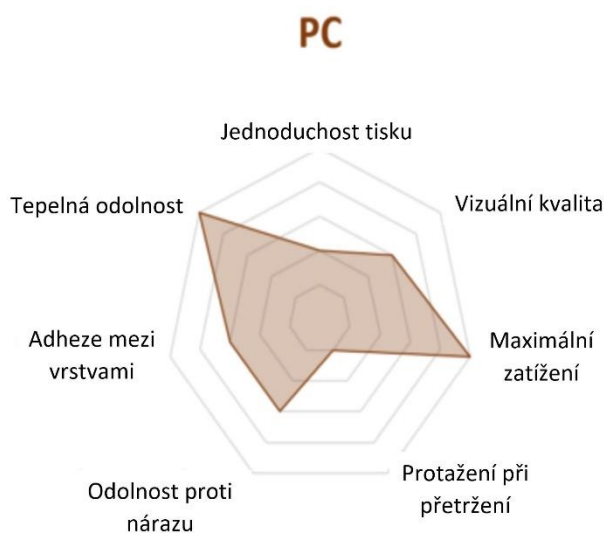
- PET – G neboli polyethyléntereftalát – glykol se pyšní vyšší odolností vůči kyselinám a rozpouštědlům, vysokým i nízkým teplotám. Je možné jej také tepelně tvarovat nebo leštit.
- PET – G/CF má ve své struktuře navíc přidány uhlíková vlákna. Ta způsobují zvýšení pevnosti i tuhosti a zabarvení do černa.



Obr. 1-5 Vlastnosti PET [12].

1.3.4 PC (polycarbonate)

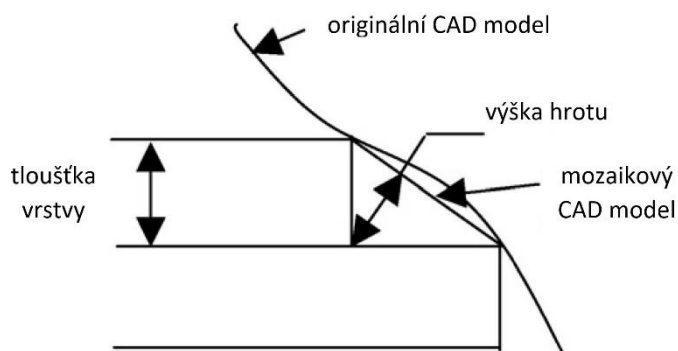
Polykarbonát je termoplast, nacházející široké uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Široké uplatnění má zejména z důvodu lepších mechanických vlastností, než jaké může nabídnout ABS a řada dalších termoplastů. Výrobky z polykarbonátu jsou přesné, pevné a odolné. Polykarbonáty mají také vyšší odolnost vůči nárazu a v porovnání s ABS snášejí lépe vyšší teploty [9, 10, 12].



Obr. 1-6 Vlastnosti PC [12].

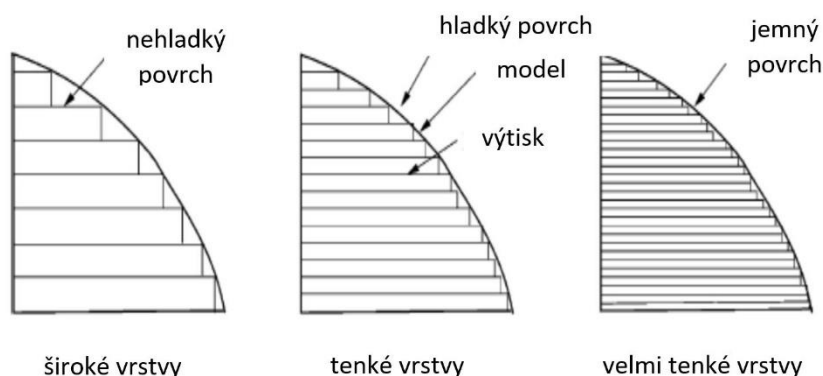
1.4 Struktura povrchu

Nerovnosti na povrchu výtisku má na svědomí samotná technologie FDM tisku. Ta, jak bylo popsáno výše, vytváří objekt po vrstvách, jež jsou na sebe postupně nanášeny. Vzniklá kontura modelu pak není hladká jako původní počítačový model, ale má schodovitý tvar, který danou konturu kopíruje. Rozdíl kontur CAD modelu a jeho výtisku je ukázán na obrázku 1-7. Možností, jak dosáhnout hladšího povrchu, máme několik [13, 14].



Obr. 1-7 Struktura povrchu tištěného objektu [15].

Tou první je změna tloušťky vrstvy modelu. Výsledkem bude zmenšení odchylek od kontury modelu a zjemnění struktury povrchu viz obrázek 1-8. Tloušťku vrstvy je však potřeba volit uvážene, protože se tím prodlužuje doba tisku a s tím spojené náklady. Druhou možností je změna orientace modelu na podložce tiskárny. Vhodnou orientací modelu lze mnohdy ovlivnit kvalitu tisku, ale i nutnou stavbu podpěr, které mohou zapříčinit vady na povrchu výtisku. Poslední možností, jak docílit požadované struktury povrchu je využít některou z metod opracování [13, 14, 15].



Obr. 1-8 Vliv tloušťky vrstvy na strukturu povrchu [15].

1.5 Povrchová úprava

Posledním krokem ke zhotovení prototypu metodou FDM tisku je využití některé z dokončovacích metod neboli post-processing. V souvislosti s tím, jaké požadavky klademe na vyrobený prototyp, se volí nejvhodnější způsob povrchové úpravy, popřípadě se vytištěný díl ponechá v původním stavu.

1.5.1 Broušení

Nejlevnější a nejdostupnější způsob úpravy povrchu prototypu. Metoda fungující na principu úběru materiálu malými nepravidelně rozloženými břity brusného nástroje, kterým může být smirkový papír nebo pásová bruska. Vyhlazení povrchu broušením je časově náročné a je tudíž vhodný spíše pro kusovou nebo malosériovou výrobu. Kombinací broušení s využitím plničů lze dosáhnout lepšího povrchu a tuto nevýhodu částečně eliminovat. Nevýhodou metody je nemožnost obroušení špatně dostupných míst a malých dílů. [16, 17]

1.5.2 Tryskání

Spolu s broušením patří tryskání mezi nejpoužívanější metody. Technologie spočívá na úběru materiálu proudem jemných abrazivních částic. Výsledkem je získání hladkého a matného povrchu bez tepelného ovlivnění. Drsnost povrchu je dána typem použitého brusiva, tlaku unášecího média, vzdálenosti trysky od objektu a dalšími aspekty. Za klady této metody lze zmínit rychlost provedení a uplatnění i u malých součástí. Na obrázku 1-9 je ukázán proces tryskání [16, 17, 18].



Obr. 1-9 Tryskání tištěného objektu [17].

1.5.3 Omílání

Omílání nachází uplatnění při nutnosti úpravy povrchů většího počtu menších částic bez nároků na přesnost. Principem metody je vyhlazování povrchu součástí abrazivními částicemi při jejich vzájemném pohybu v prostoru omílacího bubnu. Abrazivní účinek závisí na tvaru součástí, tvaru použitého omílacího bubnu, jeho pohybu a také na materiálu a tvaru abrazivních částic [16].

1.5.4 Napařování

Podstatou napařování je expozice součástí působení par. Proces je prováděn v komoře s acetonovými parami, kde jsou dílce ponechány po nezbytnou dobu. Po vyjmutí je model měkký a použitý aceton se z něj postupně odpařuje. Jakmile dojde k úplnému odpaření, je model vytvrzený a připraven k dalšímu použití [17, 18, 19].

1.5.5 Máčení

Máčení funguje obdobně jako napařování. Dílec je však vložen do lázně, čímž je zkrácena doba potřebná pro úpravu povrchu. Po vytvrzení získáme hladký a lesklý povrch, o čemž se můžeme přesvědčit na obrázku 1-10. V porovnání s napařováním je potřebná doba působení chemických látek kratší, avšak jejich spotřeba je vyšší. Je to způsobeno kontaktem dílce s kapalinou, čímž dochází k její kontaminaci [20, 21].



Obr. 1-10 Výtisk před a po máčení [21].

1.5.6 Lakování

Výsledkem lakování je vytvoření tenkého povlaku na povrchu dílu. Nástřík může mít dvě funkce, estetickou a ochrannou. Při výběru laku si volíme barvu a výsledný vzhled povrchu. Zda chceme povrch lesklý nebo matný. Z ochranného hlediska se jedná například o oddálení procesu stárnutí a degradace materiálu [18, 22].

Nejčastějším postupem při lakování je následující. Nejdříve je povrch součásti odmaštěn a opláchnut demineralizovanou vodou. Následuje sušení za tepla. Poté je dílec ochlazen a případně aktivován jeho povrch ožehem. Pak už přichází na řadu nástřík. Nakonec je dílec usušen. V případě více vrstev laku je zařazena mezioperace sušení [18, 22].

1.5.7 Galvanické pokovování

Při galvanickém pokovování je nanášena tenká vrstva kovu na povrch objektu. Pokovování kromě vzhledu zlepšuje také mechanické vlastnosti. Znamená to vyšší tvrdost, pevnost, odolnost proti opotřebení i lepší tepelnou rezistenci. To jsou faktory, které jsou zapotřebí pro funkční využití prototypu [18, 23].

2 Stavba FDM tiskárny

Součástí diplomové práce je stavba 3D tiskárny. Při výběru padla volba na zařízení s názvem Rebel II. Tiskárna spadá do projektu Reprap a mezi členy této komunity je dosti oblíbená. Oblíbenost pramení z faktů, že všechny díly, které jsou pro stavbu tiskárny potřebné, jsou snadno dostupné i v České republice. Veškeré díly potřebné pro stavbu tiskárny jsou zachyceny na obrázku 2-1. Se stavbou může být navíc nápomocno internetové fórum, kde jsou na jednom místě řešeny nejasnosti a problémy majitelů tiskáren se svými zařízeními a jejich řešení. Také jsou zde k nalezení rady, tipy a různá doporučení [24, 25].



Obr. 2-1 Díly potřebné pro stavbu tiskárny REBEL 2.

2.1 Reprap

Projekt Reprap vznikl v roce 2005, o což se zasloužil anglický akademik z University of Bath Adrian Bowyer. Hlavní myšlenkou je využití open source softwarové i hardwarové licence k přiblížení 3D tisku lidem. To znamená, že programy pro ovládání a řízení tiskáren i CAD data jejich konstrukčních dílů jsou zdarma ke stažení na internetu a jsou to právě uživatelé, kdo tento projekt dále rozvíjí [24, 26].

Na tiskárnách lze tisknout nové díly, se kterými může být složena další tiskárna. To je důvod, proč jsou tato zařízení označována jako sebe reprodukcující. Od toho je i odvozen název projektu, který je složen z anglických slov replicating rapid prototyper. To může být přeloženo jako replikací k rychlé výrobě prototypu [24].

2.2 Stavba tiskárny

2.2.1 Montáž rámu

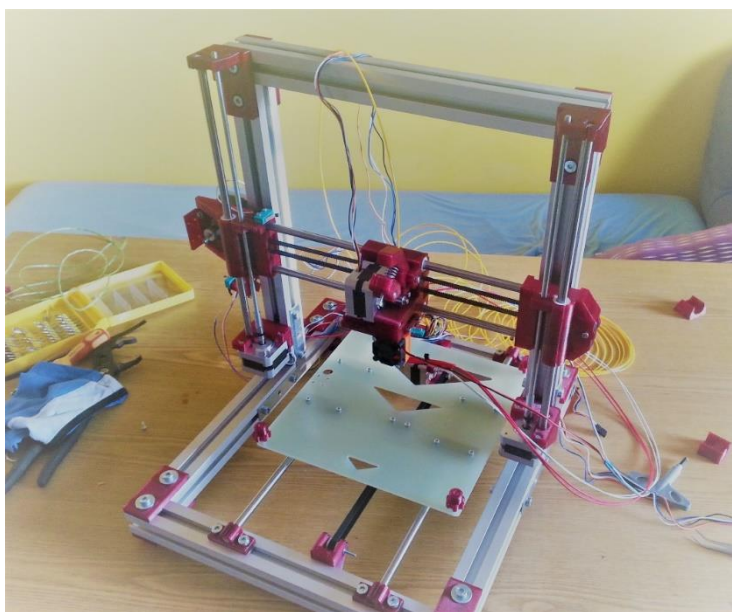
Rám tiskárny je složen z hliníkových profilů, vytištěných plastových spojovacích komponentů plus spojovacího materiálu. Hliníkové profily jsou ideální volbou, jelikož tiskárně zajišťují dostatečnou tuhost, což má vliv na výslednou kvalitu tisku. Hliník je navíc lehký a eloxovaný povrch profilů dodává rámu pěkný vzhled. Barva tištěných dílů je volitelná a záleží na vkusu stavitele. Já jsem zvolil vínově rudý odstín.

2.2.2 Montáž os a dalších mechanických dílů

Pohyb os je na tiskárně vyřešen využitím hladkých tyčí a kluzných ložisek. Tyče jsou broušeny a kaleny, abychom zvýšili přesnost tisku. Pro realizaci jejich pohybu jsou využívány ozubené řemeny a řemenice, které jsou poháněny krokovými motory. Osu z pohánění taktéž krokové motory, pohyb však způsobuje otáčení dvou rovnoběžných závitových tyčí v mosazných maticích, které jsou nehybně uloženy v lůžcích plastových dílů, jež jsou připevněny ke stojkám tiskárny.

Na osu y připevníme desku pojezdu. Do jejich rohů vložíme šrouby, na které bude posléze připevněna vyhřívaná podložka se zrcadlem.

Dalším krokem je složení tiskové hlavy. Do tištěného dílu tiskové hlavy je připevněn krokový motor s nasazeným a zajištěným ozubeným vodičem filamentu, přítlačná páčka s ložiskem a do jeho spodní části vložen hot end. Montáž mechanických dílů tiskárny je zachycena na obrázku 2-2.



Obr. 2-2 Montáž mechanických dílů tiskárny.

Nakonec na horní profil přišroubujeme stojany pro cívku s filamentem. Jedná se o dva tištěné díly, které jsou od sebe vzdáleny přibližně deset centimetrů. Do drážek stojanů vložíme tyč, na které jsou nasunuty držáky cívky filamentu. Tím je montáž mechanických dílů tiskárny hotova.

2.2.3 Elektronika

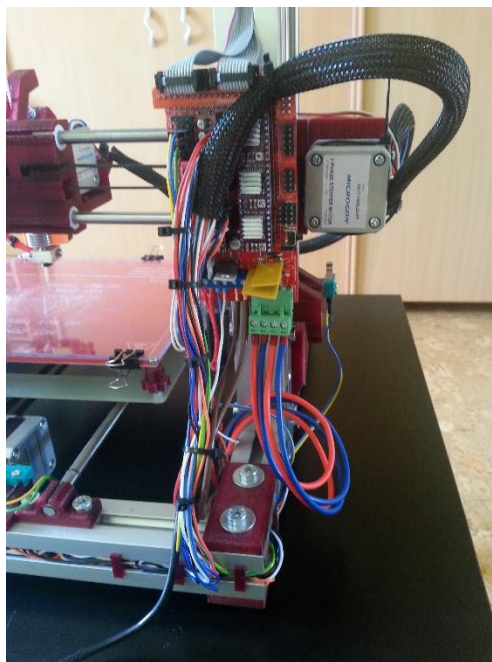
Vezmeme vyhřívanou podložku a její kabeláž protáhneme otvory pro ně určenými. Podložku usadíme na předpřipravené distanční vložky a přišroubujeme.

Na pravou stojku ze zadní strany přichytíme dva držáky. Mezi ně vložíme zdroj a po srovnání s hranou profilu připevníme.

Poté je nutno nainstalovat koncové spínače. Pro každou osu je určen jeden a jejich poloha nám udává jejich nulovou hodnotu. Přišroubujeme je tedy na jejich držáky, které umístíme na místa určená v návodu. Polohu koncového spínače osy z zatím nastavíme jen od oka [27].

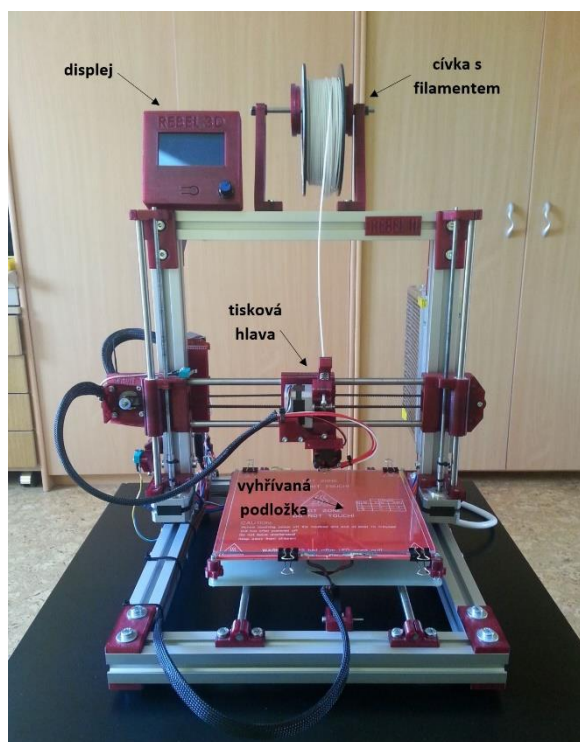
Pak již přichází na řadu řídicí jednotka tiskárny. Na zadní stranu levé stojky upevníme držák elektroniky. Na Arduino Mega 2560 s již nainstalovaným firmwarem nasadíme RAMPS 1.4. Piny pod drivery osadíme jumpery. Do RAMPS poté vložíme drivery krokových motorů, na které následně nalepíme chladiče. Sestavenou elektroniku přišroubujeme na připravený držák [27].

Kabely od elektronických dílů tiskárny přivedeme k sestavené elektronice. Vhodné je využít drážky hliníkových profilů, aby byly kabely schovány a nekazili tak estetický dojem. K RAMPS připojíme napájení a také zbylou kabeláž. Je třeba dávat pozor, abychom připojili vše na správné místo. Špatné zapojení může poškodit elektroniku. Připojené kabely doporučuji stáhnout stahovacími páskami. Nejen, že to vypadá lépe, ale také zabráníme možné kolizi s pohybující se podložkou v ose y. Zapojení veškerých kabelů s jejich následnou úpravou do svazků můžeme vidět na obrázku 2-3 [27].

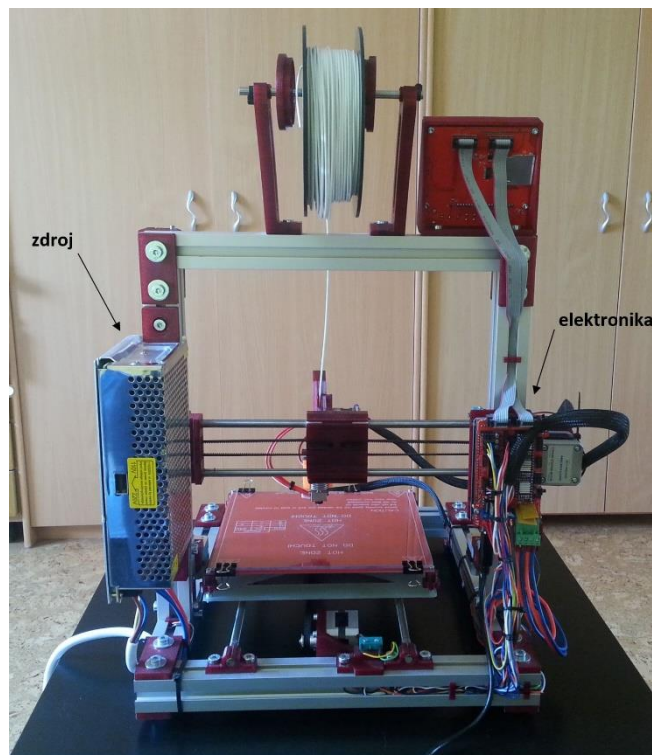


Obr. 2-3 Zapojení elektroniky a úprava kabeláže.

Posledním krokem je připojení displeje. Ten musíme vložit do vytištěného rámečku, přišroubovat a pak rámeček připevnit na horní stranu příčného profilu tiskárny. Kabel od displeje se připojí také k RAMPS. Tiskárnu máme smontovanou. Následujícím krokem bude její zprovoznění. Konečná podoba tiskárny je zachycena na obrázcích 2-4 a 2-5 [27].



Obr. 2-4 Tiskárna po montáži - přední strana.



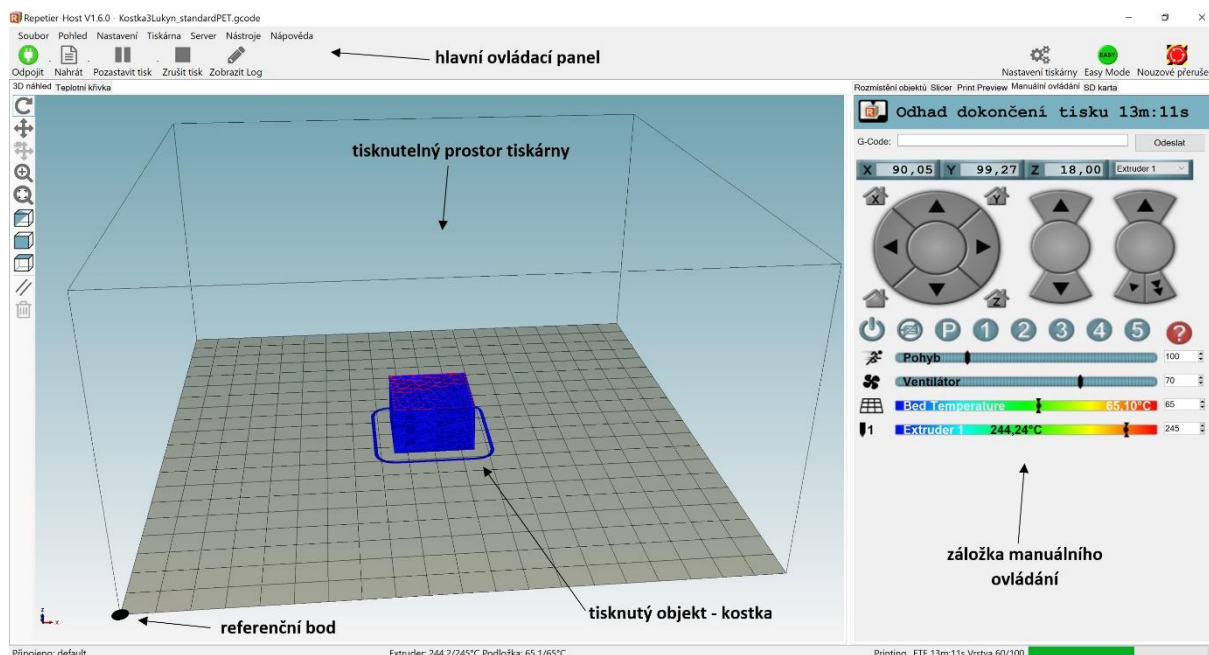
Obr. 2-5 Tiskárna po montáži - zadní strana.

2.3 Zprovoznění tiskárny

Tiskárnu můžeme přes kabel USB propojit s počítačem. Poté stáhneme z oficiálních stránek driver pro Arduino. Licence driveru je open source, tudíž je ke stažení zdarma. Po dokončení stahování provedeme standardní instalaci [27, 28].

Abychom byli schopni tiskárnu ovládat, je zapotřebí k tomu mít vhodný software. Zvolil jsem doporučený Repetier-Host, jehož licence je také bezplatná. Jakmile dokončíme instalaci, můžeme program spustit. Ze všeho nejdříve je potřeba upravit nastavení v programu, které umožní připojení tiskárny spolu s bezproblémovou komunikací mezi zařízeními. Pokud je vše nastaveno správně, po zmáčknutí tlačítka připojit se ikona rozsvítí zeleně. Připojení se zdařilo, proto můžeme přejít k dalším krokům [27, 29].

Obrázek 2-6 vyobrazuje náhled na pracovní prostředí programu Repetier-Host. Vložené popisy poukazují na nejdůležitější ovládací prvky programu.



Obr. 2-6 Repetier Host – náhled.

Přepneme program na možnost manuálního ovládání a po zadání příkazu M119 zjistíme stav endstopů neboli koncových spínačů. Postupným spínáním jsme dospěli k závěru, že jsou všechny zapojeny správně a fungují, jak by měly [27].

Dostáváme se ke zdlouhavé a nepříjemné části stavby tiskárny. Aby se tiskárna rozpohybovala, musíme nastavit adekvátní proudy pro krokové motory. Učiníme tak potenciometrem na driverech ovládající jednotlivé krokové motory. Je to zdlouhavá práce vyžadující trpělivost, protože jsou potenciometry dosti citlivé. Tiskárnu pro odzkoušení připojíme do elektrické sítě a podle výsledku proud upravíme. Jeho hodnota by měla být taková, aby se daná osa, kterou krokový motor řídí, plynule pohybovala a zároveň, aby se motorek nepřehříval. Po rozpohybování všech os se dostáváme ke zkoušení tiskové hlavy [27].

Do stojanu vložíme cívku s filamentem. Průměr struny filamentu určuje typ hot endu. V našem případě je to 1,75 mm. Filament zavedeme do extruderu. Zavádění filamentu musí jít hladce až hluboko do tiskové hlavy. Pokud ne, je nutná kontrola správného usazení hot endu v tištěném dílu. Kolečko pro posuv filamentu musí být zarovnáno s dírou v tištěném dílu. V programu Repetier-Host zkontrolujeme teplotu, kterou nám ukazuje termistor umístěný v hot endu. Jestliže zobrazená teplota odpovídá pokojové, je termistor správně zapojen a funguje [27].

Po provedení těchto úkonů nastavíme v programu teplotu, například 230 °C. a spustíme ohřev trysky. Během ohřevu se musí roztočit ventilátor. Jakmile docílíme zadané teploty, zadáme v počítači příkaz pro posuv filamentu. Podle reakce tiskárny upravíme potenciometrem proud do krokového motoru, který má posuv filamentu na starosti. Optimální hodnotu určíme stejně jako u krokových motorů pro pohon os [27].

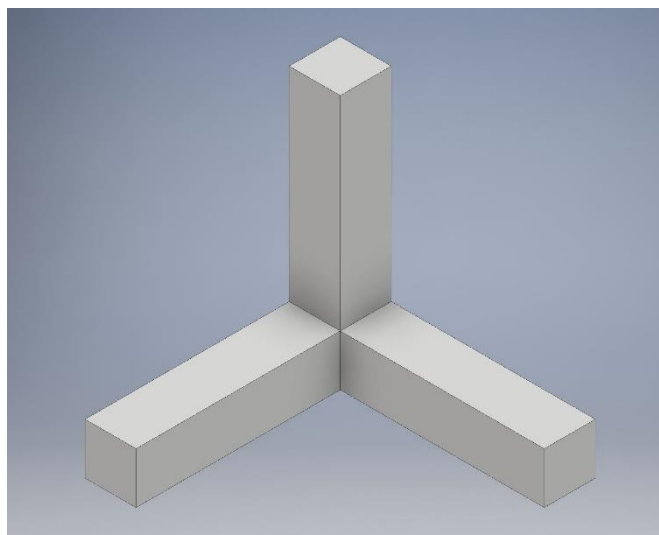
Po zdárném nastavení proudu motorku extruderu zbývá upravit počet jeho kroků na 1 mm filamentu. Na strunu si uděláme značky podle pravítka. Pak zmáčkne tlačítko pro posuv filamentu o určitou vzdálenost. Tu porovnáme s reálným posuvem. Pomocí obyčejné trojčlenky vypočítáme počet kroků potřebných pro vytlačení právě jednoho milimetru materiálu. Vypočtenou hodnotu posléze zadáme v nastavení EEPROM firmwaru [27].

Dalším krokem pro úspěšné seřízení tiskárny je ustavení koncového spínače pro osu z do správné pozice. To provedeme posunem tištěného dílu v drážce profilu. Pro zamezení kolize trysky se zrcadlem, což by mohlo vést k jeho rozbití, začneme raději s rezervou o něco výše. Po zadání příkazu pro posuv v ose z do nulové hodnoty vidíme vzdálenost trysky od zrcadla. Zkoušením tuto vzdálenost postupně zmenšujeme, až se dostaneme na distanc přibližně jednoho milimetru. Jemné doladění provedeme šroubkem na držáku koncového spínače. Šroub s pružinou postupně povolujeme, čímž posunujeme spínač směrem dolů. Seřízení dokončíme v momentu, kdy mezi trysku a zrcadlo jsme schopni vložit jeden list papíru. Papír by měl správně lehce drhnout [27].

Seřízení dokončíme ustavením roviny zrcadla do vodorovné polohy. Po kontrole termistoru, jako v případě hot endu, zapneme vyhřívání podložky. Tím se nám podložka postupně srovná, jelikož byla již při koupi lehce prohnutá. Ustavení podložky provedeme postupným přejížděním trysky do rohů zrcadla a distančními sloupky v rozích upravíme výšku podložky. Finální výška na celé ploše podložky by měla odpovídat běžnému kancelářskému papíru [27].

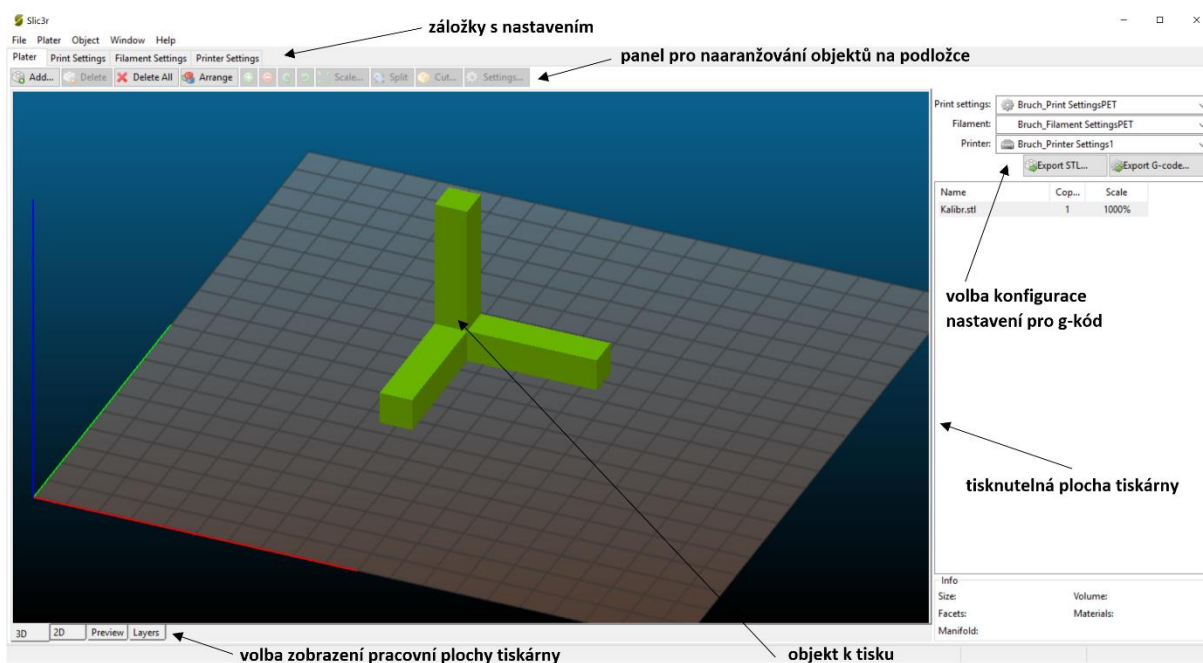
2.4 První tisk

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, prvním krokem při výrobě prototypu je vytvoření modelu objektu. K jeho vytvoření byl využit program Autodesk Inventor Professional 2017, jehož studentská verze je zdarma dostupná na stránkách společnosti. Jako nejvhodnější tvar byl zvolen osový kříž viz obrázek 2-7. Na něm pak budeme schopni zhodnotit kolmost os, rozměrovou přesnost i vzhled výtisku. Délka ramen byla určena padesát milimetrů, jejich průřez tvořil čtverec o délce strany deset milimetrů. Vymodelovaný objekt byl pak uložen ve formátu .stl [30].



Obr. 2-7 Model osového kříže pro kalibraci tiskárny.

Soubor s příponou .stl otevřeme v programu zvaném Slicer. Jedná se o softwarový nástroj, který dokáže konvertovat 3D data do souboru instrukcí pro program, jež ovládá tiskárnu. V našem případě pro Repetier-Host. Z několika možností byl vybrán Slic3r. Patří mezi nejpoužívanější, navíc je také snadno dostupný a zdarma ke stažení na internetu. Jeho prostředí je zachyceno na obrázku 2-8 [31].

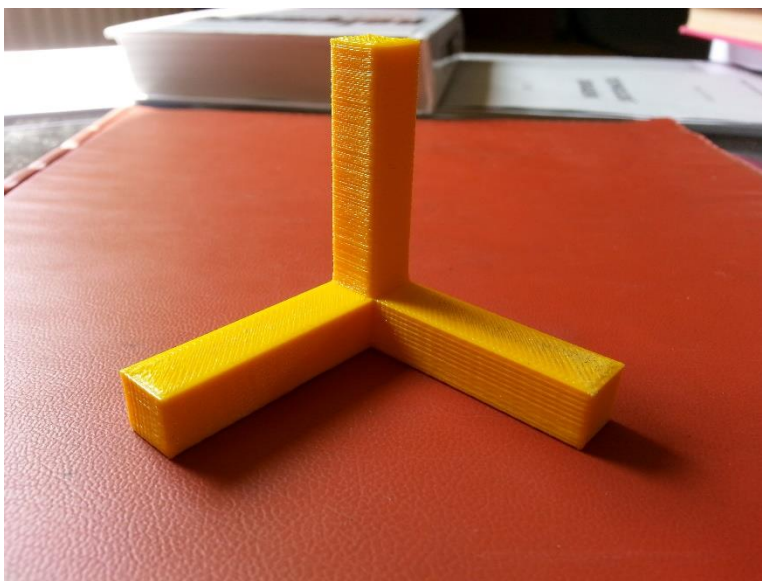


Obr. 2-8 Slicer – náhled.

Ve Slic3ru je několik záložek s nastavením. Každou záložku je potřeba projít a určit parametry podle typu tiskárny, typu použitého materiálu i parametry pro tisk. Nahraný model si na vyobrazené podložce můžeme upravit. Z možností je k dispozici například vložení a rozmístění více modelů, změna jejich měřítka či orientace. Z výsledné

konfigurace objektů a upraveného nastavení je vygenerován zmíněný soubor instrukcí, který se nazývá g-kód.

G-kód nahrajeme do Repetier-Hostu. K počítači již tiskárnu máme, zbývá ještě připojení k elektrické síti. Pro lepší přilnavost první vrstvy natřeme zrcadlo tuhým lepidlem. Pak již dáme pokyn k zahájení tisku. Tiskárna přesune trysku do referenčního bodu, který je zde definován jako bod s nulovými souřadnicemi ve všech osách. Souběžně se spustí vyhřívání trysky i podložky na zadané teploty. Jakmile je teplot dosaženo, spustí se tisk. Po nanesení všech vrstev je model vytisknut a následuje vyhodnocení. Pokud není vytištěný objekt podle našich představ, upravíme nastavení Slic3ru a proces opakujeme, dokud nezjistíme optimální nastavení teplot, výšky vrstev, rychlostí, množství a způsob výplně a tak dále [27].



Obr. 2-9 Vytištěný osový kříž.

Po několika pokusech a hrátkách s nastavením se zdařilo zhotovit slušně vypadající výtisk, který můžeme vidět na obrázku 2-9. První vrstva se od podložky neodlepovala a materiál se netrhal. Množství materiálu procházející tryskou bylo taktéž v pořádku, protože se všechny plné vrstvy zaplnily bez prosvítání a ani horní stěny výtisku se nepropadaly. Obvodové stěny mají vrstvenou strukturu bez defektů. Kolmost ramen byla také v pořádku. Rozměry dílu byly lehce odlišné od těch na modelu. Tyto odchylky byly vyřešeny výpočtem a úpravou hodnot v nastavení EEPROM firmwaru. Postup byl stejný jako při úpravě posuvu filamentu. Tiskárnu nyní máme zprovozněnu a zkalibrovánu.

3 TEPELNÉ ÚPRAVY POVRCHU

3.1 Návrh experimentů

Tepelné úpravy povrchu budou provedeny dvěma způsoby. Působením zvýšenými teplotami v hodnotách blízkých bodu tání použitých materiálů očekáváme změny jejich povrchu. Změny by se měly projevit úpravou vzhledu a drsnosti povrchu, který má po tisku na FDM tiskárně vrstvenou strukturu. Po tepelném opracování bude každý vzorek proměřen a také slovně zhodnocen. Výsledkem experimentů bude získání závislostí změn drsnosti povrchu tištěných objektů na teplotě, která na ně působila. Dále budeme schopni určit, jakých teplot bude vhodné použít, abychom docílili požadovaného vzhledu povrchu. Posledním a nejdůležitějším výsledkem bude zjištění, zda jsou navržené metody úpravy povrchu vhodné k použití v praxi či nikoliv.

3.2 Zkoušené materiály

Pro tepelné opracování jsem zvolil materiály dva a jsou jimi PLA a PET-G. Jedná se o dostupné a běžně využívané termoplasty pro 3D tisk technologií FDM. Nákup obou materiálů byl pro dosažení přesnějších výsledků proveden u jednoho výrobce, kterým bylo Eco3D filament, s.r.o. PLA v barvě bílé, PET-G má transparentní žlutou. Rozdílnost barev výsledky měření drsnosti povrchu nijak neovlivní, a navíc usnadní rozlišení materiálů.

Jelikož se jedná o rozdílné materiály, bylo pro jejich tisk zapotřebí odlišných teplot hot endu i vyhřívané podložky. Pro PLA jsem zvolil kombinaci teplot 220 °C/45 °C. Pro PET-G to bylo 245 °C/65 °C.

Materiál ABS, který je pro FDM tisk používán nejběžněji, jsem vyloučil z výběru záměrně. Prvním důvodem byla emise toxických zplodin během tavení tohoto termoplastu, což předurčuje jeho nevhodnost k tepelnému opracování. Druhým důvodem byla rozpustnost ABS v acetonu. Té je využíváno při úpravách povrchu vytištěných objektů chemickou cestou. Zkoumání tepelných úprav povrchu objektů z ABS tudíž přikládám malou důležitost.

3.3 Objekty zkoušení

Pro experimenty budou použity vytištěné díly z tiskárny REBEL 2, jejíž stavba a zprovoznění bylo popsáno ve druhé kapitole. Pro vzorky jsem se rozhodl použít modely ve tvaru krychle. Krychle má hned čtyři stěny, které jsou rovnoběžné s osou z a mají tudíž vrstvenou strukturu, která zde bude zkoumána. Pokud by náhodou některá z nich obsahovala vady, je tak možnost vybrat pro tepelné opracování a

měření stěnu jinou. Délku hrany krychle jsem zvolil třicet milimetrů. Tato délka byla vybrána ze dvou důvodů. Prvním je velikost hubice horkovzdušné pistole, která bude použita v prvním experimentu. Tím druhým je vzdálenost, která je potřeba pro měření drsnoměrem. Zdvih použitého drsnoměru je 17,5 mm. Měření tak může být provedeno v dostatečné vzdálenosti od okraje stěny, což by jej mohlo zkreslovat [32].

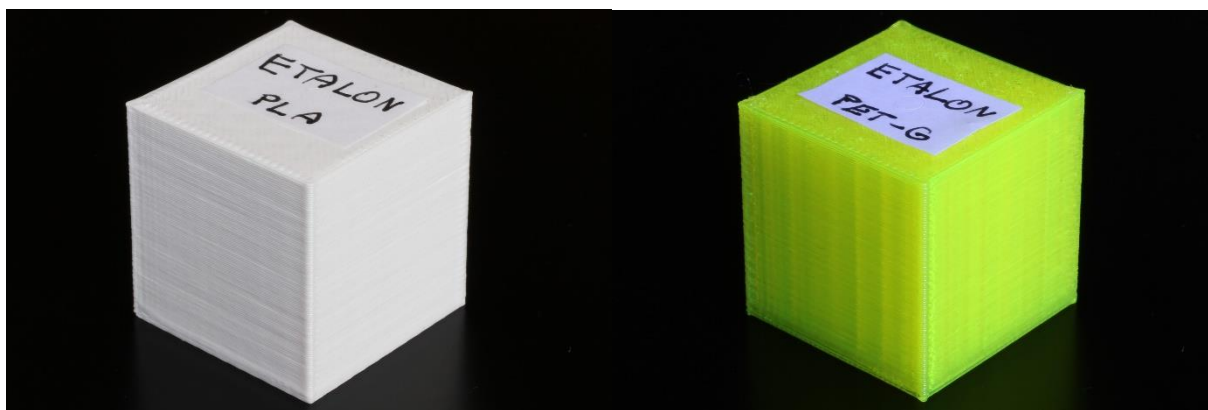
Základní parametry pro tisk vzorků pro experimenty jsou shrnuty v tabulce 3-1. Uvedené hodnoty byly použity pro oba materiály.

Tab. 3-1 Parametry pro tisk vzorků.

Parametr:	Hodnota:	Jednotka:
rozměry	30x30x30	[mm]
výška vrstvy	0,3	[mm]
počet vrstev	100	[-]
počet plných vrstev naspodu	3	[-]
počet plných vrstev nahoře	3	[-]
výška první vrstvy	100	[%]
extruze první vrstvy	120	[%]
vzor výplně plných vrstev	rectilinear	[-]
vzor výplně	honeycomb	[-]
rychlost tisku – perimetr	60	[mm.s ⁻¹]
rychlost tisku – výplň	40	[mm.s ⁻¹]
rychlost tisku první vrstvy	50	[%]
rychlost při přejíždění	80	[mm.s ⁻¹]

3.4 Etalony

Na obrázku 3-1 můžeme vidět vytištěný etalon pro oba materiály. Vůči nim se budou porovnávat výsledky z obou experimentů.



Obr. 3-1 Etalon PLA a PET-G.

Na obou kostkách bylo provedeno měření drsnosti, abychom získali výchozí hodnoty pro porovnávání s tepelně opracovanými objekty. Měření bylo provedeno na drsnoměru značky Mitutoyo s označením SJ-210. Přístroj je vybaven funkcí automatické kalibrace. Kalibrace s využitím referenčního etanolu s předepsanou drsností povrchu je zachycena na obrázku 3-2. Proběhla v pořádku, tudíž můžeme

měření považovat za přesné. Parametry pro měření drsnosti jsou shrnuty v tabulce 3-2. Volba parametrů uvedených v tabulce 3-2 pro měření drsnosti byla provedena s využitím normy ČSN EN ISO 3274 [33].



Obr. 3-2 Kalibrace drsnoměru.

Tab. 3-2 Parametry pro měření drsnosti povrchu.

Parametr:	Hodnota/Typ:	Jednotka:
norma	ČSN EN ISO 4287	[-]
profil	R	[-]
počet měřených parametrů	2	[-]
filtr	Gauss	[-]
cut-off délka λ_c	0,08	[mm]
cut-off délka λ_s	2,5	[μm]
rychlost měření	0,25	[mm.s ⁻¹]
snímací metoda	indukční	[-]
snímací dotek	diamantový hrot	[-]

Námi sledovanými veličinami budou průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu s označením Ra a nejvyšší výška profilu označovaná písmeny Rz. Pojem nejvyšší výška profilu je trochu zavádějící. Je tím myšlen součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Na zkalibrovaném drsnoměru budou provedeny měření drsnosti povrchu všech testovaných vzorků. Měření drsnosti je zachyceno na obrázku 3-3. Výsledky měření drsnosti povrchu etalonů jsou uvedeny v tabulce 3-3 [34].

Tab. 3-3 Drsnost povrchu etalonů.

	Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [μm]:	Největší výška profilu Rz [μm]:
Etalon PLA	21,239	91,330
Etalon PET-G	22,905	97,151



Obr. 3-3 Měření drsnosti povrchu.

3.5 Experiment 1

V prvním experimentu bude pro tepelné ovlivňování struktur povrchu využito horkovzdušné pistole. Konkrétně se bude jednat o pistoli značky Steinel HL 1910 E. Jedná se o výkonné zařízení s možností plynulé teplotní regulace. Teplotní rozsah je výrobcem udáván od 50 °C do 600 °C. Proud ventilovaného vzduchu můžeme volit ve třech stupních. Nastavit můžeme proudění o objemu 150, 300 nebo 500 litrů za minutu. Jelikož při nejslabším stupni jsme schopni dosáhnout jen nízkých teplot, bude využito druhého stupně.

Pro určení teploty proudícího vzduchu bude využito teplotní sondy připojené k multimetru. Multimetr nese onačení UNI-T UT39C od výrobce UNI-TREND. Sonda bude po spuštění horkovzdušné pistole vložena do proudu emitovaného vzduchu ve stejné vzdálenosti, jako bude následně umístěn vzorek experimentu. Vzdálenost byla zvolena na hodnotu 30 mm.

Na multimetru se nám zobrazí aktuální teplota. V zadní části pistole se nachází regulační kolečko, díky němuž jsme schopni nastavit požadovanou teplotu. Bohužel díky proudění vzduchu není zobrazovaná hodnota teploty ustálená. Rozsah zobrazovaných teplot je přibližně 10 °C. Za správnou budeme považovat tu nejvyšší. V tomto experimentu budou provedeny tři měření pro každý materiál.

Aby bylo zajištěno proudění vzduchu neměnným směrem a vždy ze stejné vzdálenosti, byla horkovzdušná pistole umístěna do svěráku. Vedle něj bylo umístěno několik podložek navršených na sebe takovým způsobem, aby byla tištěná kostka ve stejné výšce, jako hubice pistole. Vzdálenost kostky od hubice byla přesně určena za pomoci posuvného měřítka. Ustavení horkovzdušné pistole spolu s umístěním kostky je patrné z obrázků 3.4 a 3.5. Doba působení horkého vzduchu na vytisknuté vzorky byla stanovena na 2 minuty. Odměření času bylo provedeno na stopkách.

Výsledný vzhled tepelně opracovaných kostek je zachycen na obrázcích 3-6 až 3-11. Parametry a výsledky měření pak v tabulkách 3-4 až 3-9.



Obr. 3-4 Provedení experimentu 1.



Obr. 3-5 Ustavení kostky do přesné vzdálenosti.

3.5.1 Vzorek A200



Obr. 3-6 Vzorek A200.

Tab. 3-4 Měření vzorku A200.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	A200	[-]
materiál	PLA	[-]
naměřená teplota	200	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
rychlost proudění vzduchu	300	[l.min ⁻¹]
doba působení	120	[s]
vzdálenost	30	[mm]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	0,632	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	3,348	[μm]
slovní hodnocení	Zanedlouho po začátku působení horkého proudu vzduchu se začala struktura povrchu měnit. Materiál se začal tavit a stěna kostky dle očekávání vyhlazovat. Vlivem proudu vzduchu však stěna změnila svůj tvar a byla mírně vtlačena dovnitř. Odpor proti vtlačení kladla výplň kostky, která je na zkoumaném povrchu patrná. Po dokončení experimentu jsme získali sice hladký, ale zvrásněný a prohnutý povrch.	

3.5.2 Vzorek A220



Obr. 3-7 Vzorek A220.

Tab. 3-5 Měření vzorku A220.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	A220	[-]
materiál	PLA	[-]
naměřená teplota	220	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
rychlost proudění vzduchu	300	[l.min ⁻¹]
doba působení	120	[s]
vzdálenost	30	[mm]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	0,855	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	4,574	[μm]
slovní hodnocení	Po zvýšení teploty o 20 °C oproti předchozímu pokusu nastal obdobný průběh. Stěna kostky se začala natavovat a zjemňovat svoji strukturu. Ke vtlačení stěny dovnitř vzorku došlo také a tepelně ovlivněná stěna má téměř totožný vzhled. Hloubka vtlačení je však o něco větší.	

3.5.3 Vzorek A240

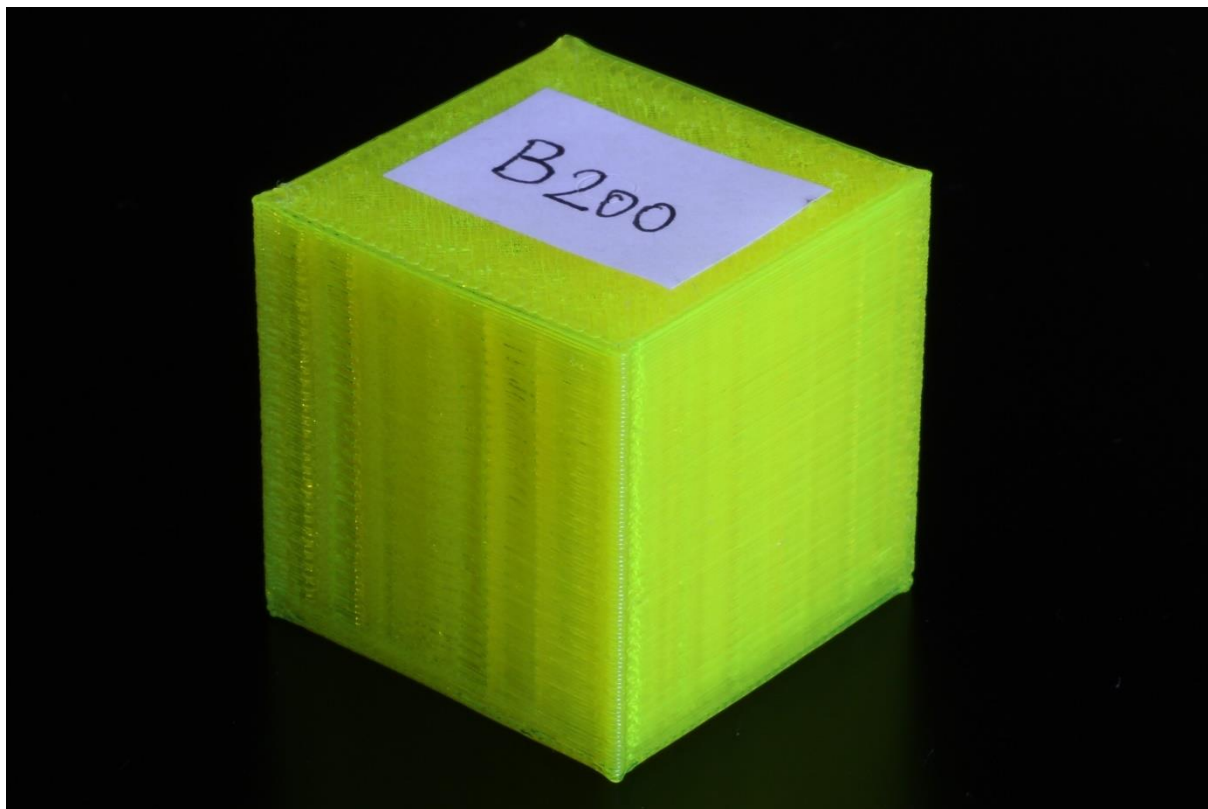


Obr. 3-8 Vzorek A240.

Tab. 3-6 Měření vzorku A240.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	A240	[-]
materiál	PLA	[-]
naměřená teplota	240	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
rychlost proudění vzduchu	300	[l.min ⁻¹]
doba působení	120	[s]
vzdálenost	30	[mm]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	neměřeno	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	neměřeno	[μm]
slovní hodnocení	Třetí vzorek byl vystaven teplotě 240 °C, což je vyšší hodnota než doporučená maximální teplota trysky pro tisk, kterou uvádí výrobce. Výsledný povrch je hladký, téměř bez známky původních vrstev. Stěna kostky je ale opět zvrásněna a vtlačení je tak hluboké, že měření drsnosti povrchu nebylo možno provést.	

3.5.4 Vzorek B200

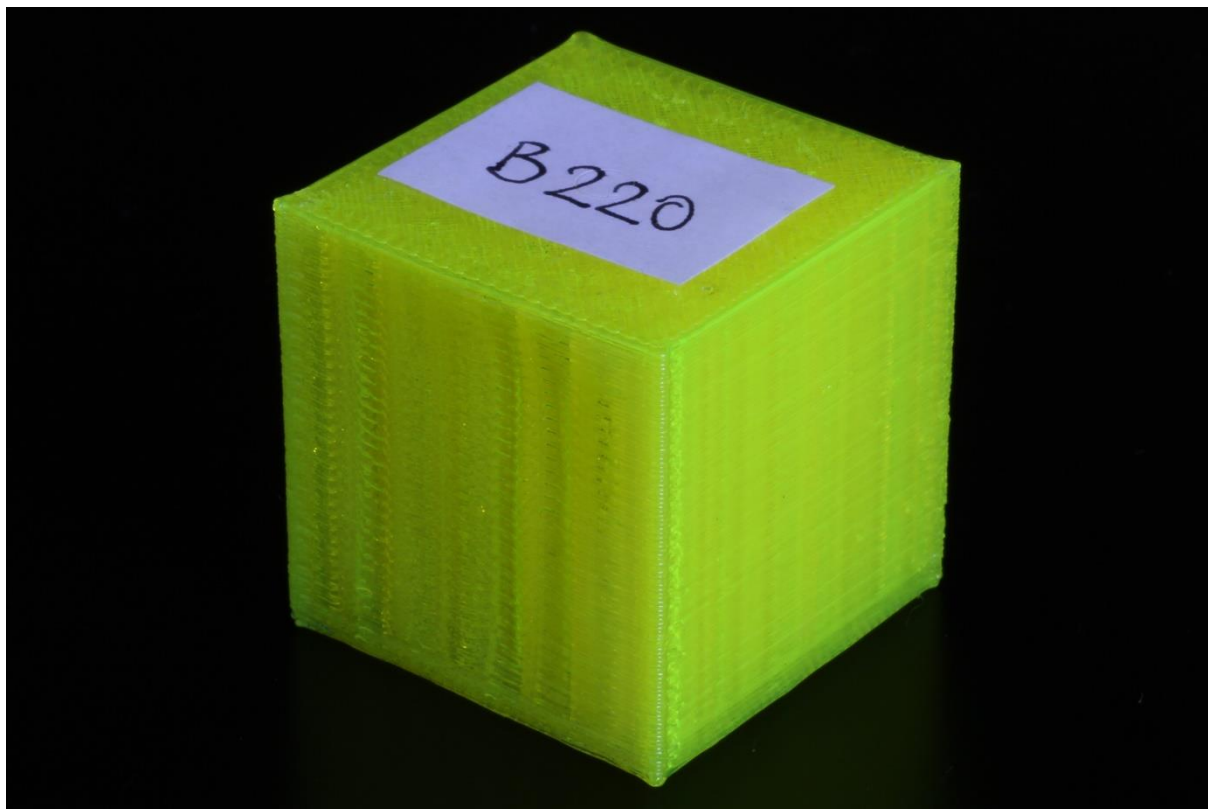


Obr. 3-9 Vzorek B200.

Tab. 3-7 Měření vzorku B200.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	B200	[-]
materiál	PET-G	[-]
naměřená teplota	200	[°C]
přesnost měření	± (2 % + 8)	[°C]
rychlost proudění vzduchu	300	[l.min ⁻¹]
doba působení	120	[s]
vzdálenost	30	[mm]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	1,285	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	6,829	[μm]
slovní hodnocení	Při vhánění horkého vzduchu na stěnu kostky z materiálu PET-G došlo také ke zjemnění povrchu. Změna ale nebyla tak výrazná jako u PLA, což je zjevné také na hodnotách drsnosti povrchu. Hloubka vtlačení stěny je také menší. Rozdíl hloubek ale není příliš výrazný.	

3.5.5 Vzorek B220

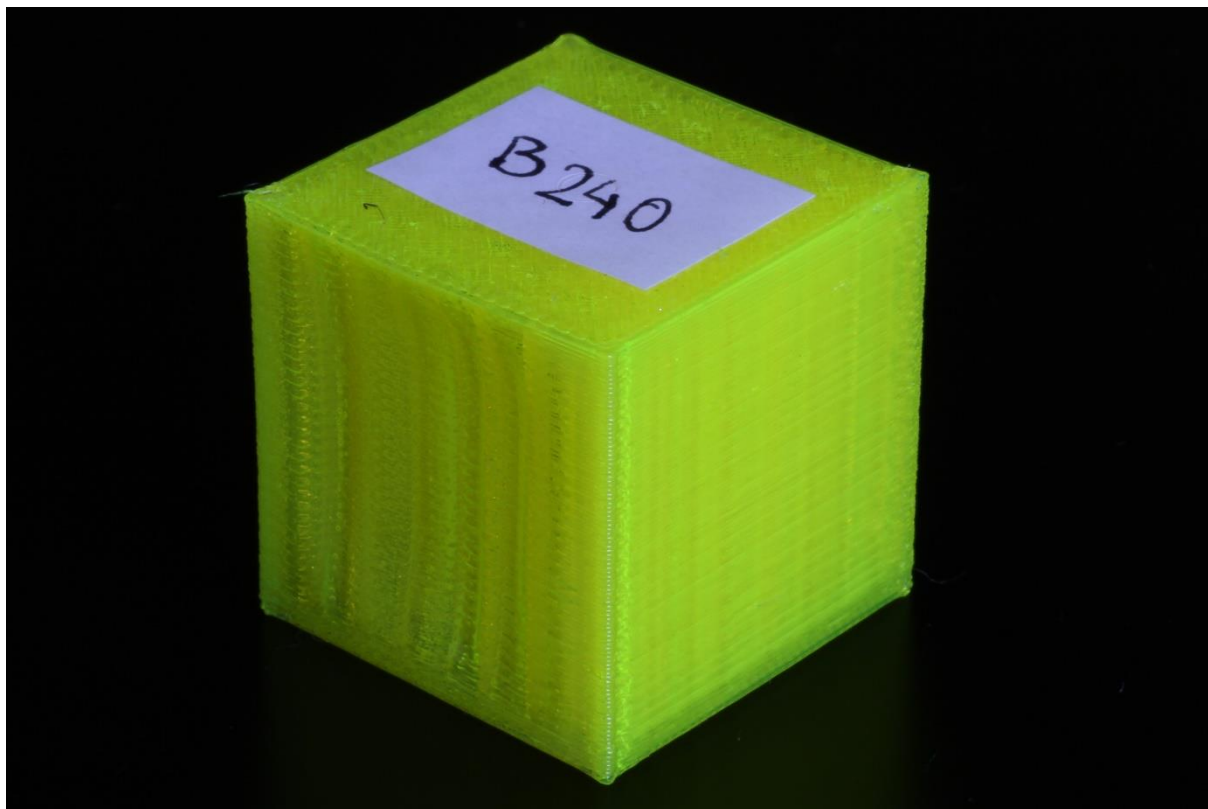


Obr. 3-10 Vzorek B220.

Tab. 3-8 Měření vzorku B220.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	B220	[-]
materiál	PET-G	[-]
naměřená teplota	220	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
rychlost proudění vzduchu	300	[l.min ⁻¹]
doba působení	120	[s]
vzdálenost	30	[mm]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	0,682	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	3,464	[μm]
slovní hodnocení	Stěna kostky při tomto pokusu získala podobný vzhled, jako tomu bylo u vzorku B200. Vyšší teplota zde zapříčinila výraznější vtlačení stěny zároveň se zjemněním struktury povrchu. Podle hodnot měření drsnosti jsme docílili téměř dvakrát hladšího povrchu. Při přejetí stěny nehtem již necítíme vrstvy původního povrchu.	

3.5.6 Vzorek B240

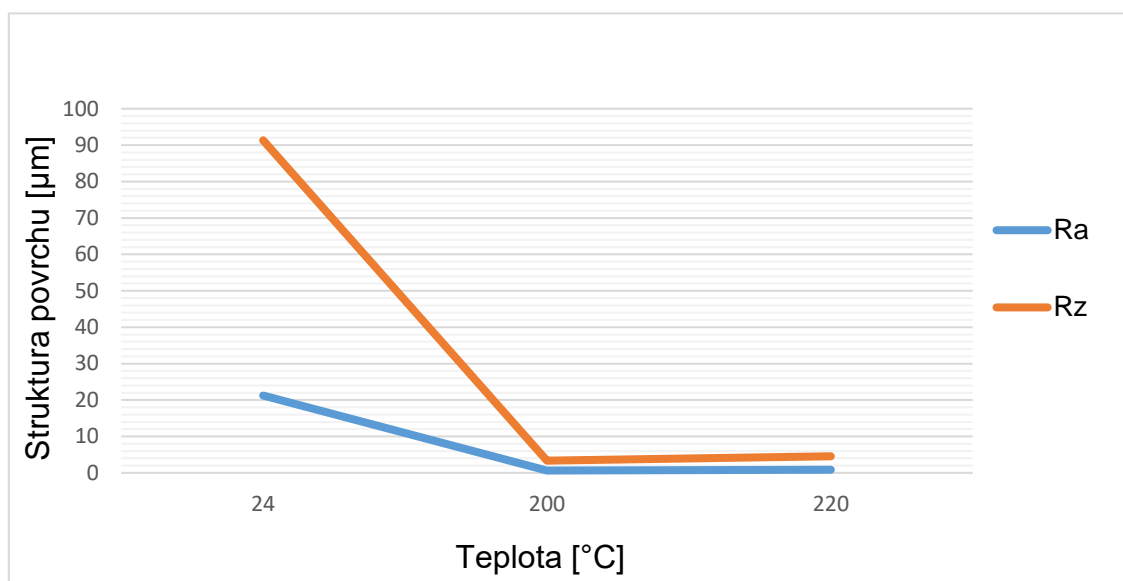


Obr. 3-11 Vzorek B240.

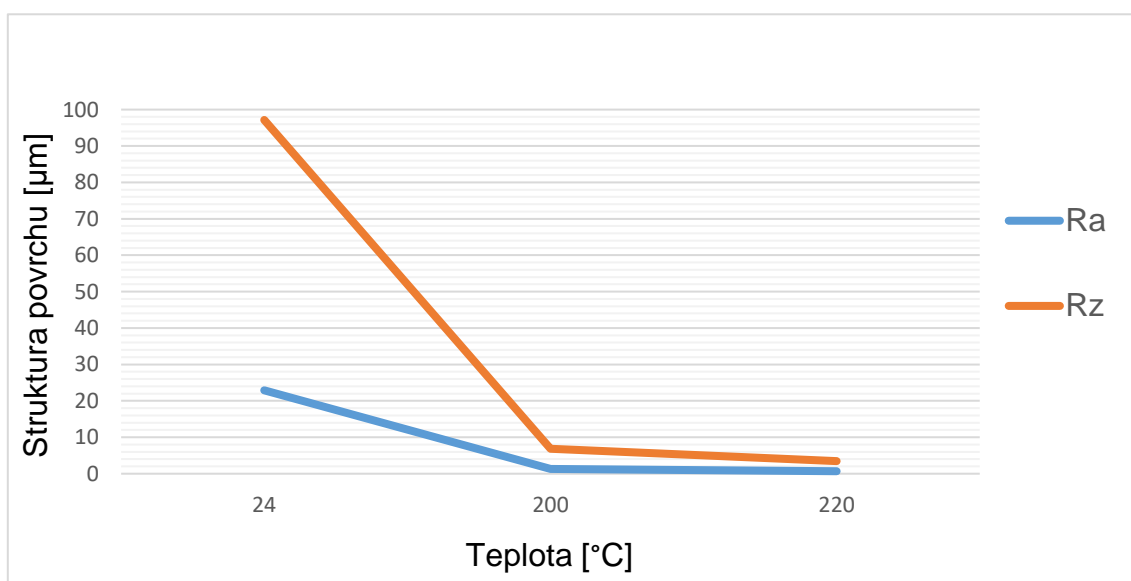
Tab. 3-9 Měření vzorku B240.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	B240	[-]
materiál	PET-G	[-]
naměřená teplota	240	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
rychlost proudění vzduchu	300	[l.min ⁻¹]
doba působení	120	[s]
vzdálenost	30	[mm]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	neměřeno	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	neměřeno	[μm]
slovní hodnocení	Vzhled povrchu je i u třetího vzorku obdobný. Zvýšení teploty způsobilo ještě větší vtlačení stěny vzorku, čímž se nám ještě zřetelněji ukázala použitá struktura výplně vzorku. Hloubka vtlačení nám neumožňuje zjistit drsnost výsledného povrchu. Pohledem a hmatem můžeme hovořit o spojitém a hladkém povrchu.	

3.5.7 Výsledky experimentu 1



Obr. 3-12 Graf znázorňující změnu drsnosti povrchu - vzorky A.



Obr. 3-13 Graf znázorňující změnu drsnosti povrchu - vzorky B.

Během experimentu došlo ke změnám struktury povrchu, jak můžeme vidět v grafech na obrázcích 3-12 a 3-13. Materiál použitých vzorků se působením horkého proudu vzduchu začal tavit a stěna vzorků zjemňovala svůj povrch. Hodnoty parametru nejvyšší výšky profilu Rz klesly téměř dvacetinásobně. S ním spojená průměrná aritmetická úchylka profilu Ra také. Pro nemožnost provést měření na vzorcích A240 a B240 jsou výsledné křivky složeny jen ze tří bodů.

Hodnoty drsnosti povrchu u některých vzorků dosáhla hladiny, které dosahujeme u strojních součástí po operaci broušení. Výsledné hodnoty drsností vzorků po provedení experimentu jsou tudíž uspokojivé.

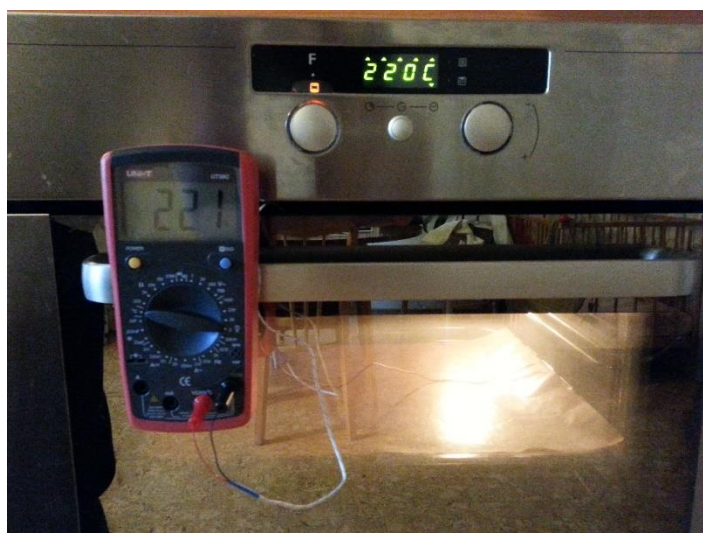
Co však uspokojivé není, je výsledný tvar stěn. Proud vzduchu z horkovzdušné pistole způsobil jejich deformaci. Získaný povrch je ve všech případech zvrásněný, navíc vtlačen dovnitř vzorku. Provedené změny na vzorcích jsou nevratné a provedením experimentu byly kostky znehodnoceny.

3.6 Experiment 2

Ve druhém experimentu bude místo horkovzdušné pistole využito kuchyňské trouby. Ta zde nahradí indukční pec, které bývá využíváno v laboratořích či běžné praxi. Pec nám vytvoří prostředí mající teplotu, kterou jsme si při spuštění trouby navolili.

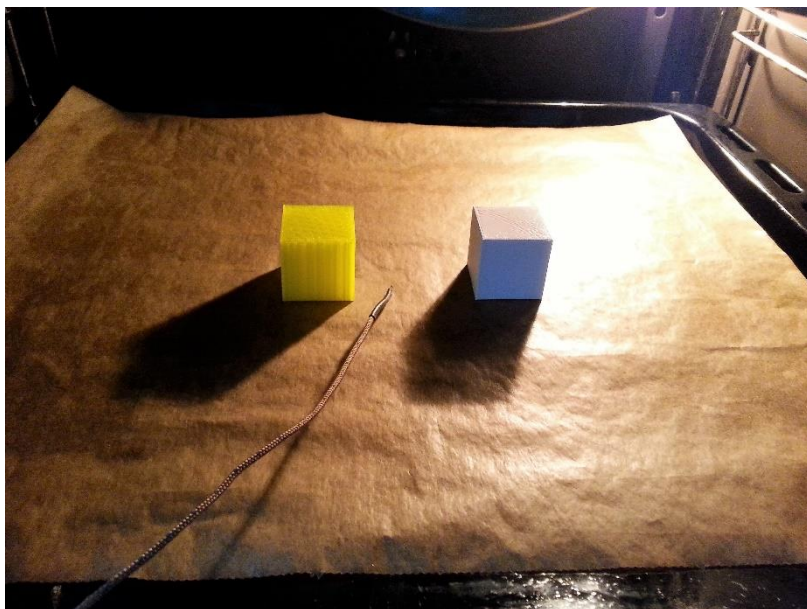
Nastavená teplota na displeji kuchyňské trouby nemusí být přesná, a proto pro zjištění přesné hodnoty využijeme teplotní sondy s multimetrem, které jsme využívali již při prvním experimentu.

Průběh experimentu bude vypadat následovně. Troubu zapneme a na displeji nastavíme teplotu 180 °C. To bude výchozí teplotní hladina pro tento experiment. Po zapnutí vložíme do trouby teplotní sondu. Její umístění bude ve středu trouby, jelikož očekáváme, že se zde bude skutečná teplota co nejvíce blížit té nastavené. Porovnání nastavené a naměřené teploty je zachyceno na obrázku 3-14. Do středu trouby pak budou vkládány také vzorky experimentu viz obrázek 3-15. Jakmile dá trouba znamení, že bylo dosaženo požadované teploty, vložíme do ní první sadu vzorků. Nastavenou i skutečnou teplotu si zaznamenáme.



Obr. 3-14 Nastavená a naměřená teplota

Doba ponechání testovaných kostek v troubě byla stanovena na dvě a půl minuty. Přidaná půlminuta oproti předchozímu experimentu je z důvodu poklesu teploty v troubě během vkládání vzorků. Během předchozích pokusů bylo zjištěno, že požadované teploty je po otevření dvířek trouby dosaženo po uplynutí doby patnácti až třiceti sekund. Doba působení teplot na vzorky tudíž bude přibližně dvě minuty. Čas bude opět odměřen na stopkách.



Obr. 3-15 Umístění vzorků i teplotní sondy.

Po uplynutí času pro první sadu vzorků budou z trouby vyjmuty a nastavena nová teplota. Ta bude o 10 °C vyšší, tedy 190 °C. Popsaný proces se opakuje do té doby, než budou do trouby postupně vloženy všechny sady vzorků. Pro tento experiment bylo vytištěno celkem sedm sad. Pro materiál PET-G byl vytisknut jeden vzorek navíc, abychom zaznamenali výsledek po tepelném opracování i pro vyšší teplotu, než je jeho doporučená teplota pro tisk.

Vzorky byly vyjmuté z trouby spolu s pečícím papírem, který zabraňoval připečení kostek k plechu. Vyjmuté vzorky byly položeny na stůl a ponechány při pokojové teplotě. Další manipulace byly prováděny až po úplném vychladnutí, aby bylo zabráněno mechanickým deformacím jejich tvaru. Vyobrazení jejich konečného vzhledu a tvaru spolu s výsledky měření budou zachyceny na obrázcích 3-16 až 3-30, respektive v tabulkách 3-10 až 3-24.

3.6.1 Vzorek C180



Obr. 3-16 Vzorek C180.

Tab. 3-10 Měření vzorku C180.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	C180	[-]
materiál	PLA	[-]
nastavená teplota	180	[°C]
naměřená teplota	182	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	21,601	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	95,407	[μm]
slovní hodnocení	U vzorku ke zlepšení drsnosti povrchu nedošlo, ba naopak. Podle naměřených hodnot se dokonce mírně zhoršila. Boční stěny krychle jsou lehce vybouleny. Při měření bylo zjištěno, že v průběhu experimentu došlo ke zúžení kostky. Spodní vrstvy jsou roztečeny do stran. Odchylka od původního tvaru je u spodních vrstev v řádu několika desetin až jednoho milimetru.	

3.6.2 Vzorek C190



Obr. 3-17 Vzorek C190.

Tab. 3-11 Měření vzorku C190.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	C190	[-]
materiál	PLA	[-]
nastavená teplota	190	[°C]
naměřená teplota	189	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	11,925	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	71,720	[μm]
slovní hodnocení	Hodnota drsnosti zde dosáhla překvapivé hodnoty. Boční stěny kostky však vizuálně odpovídají povrchu předešlého vzorku nebo etalonu. K mírnému vyboulení a zúžení zde došlo obdobně, jako u vzorku C180. Roztečení spodních vrstev proběhlo také a ve větším měřítku. Při pohledu na spodní stěnu můžeme pozorovat vyboulení a porušení její celistvosti.	

3.6.3 Vzorek C200



Obr. 3-18 Vzorek C200.

Tab. 3-12 Měření vzorku C200.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	C200	[-]
materiál	PLA	[-]
nastavená teplota	200	[°C]
naměřená teplota	203	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	20,747	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	95,325	[μm]
slovní hodnocení	Hodnota drsnosti je i při 200 °C téměř neměnná. Na horní stěně vznikly výstupky. Způsobila to vysoká teplota, která rozpíná vzduch uvnitř struktury kostky. Výstupky vnikly také na bocích. Zde však ve formě pruhů po celé výšce. Roztečení spodních vrstev je s vyšší teplotou dle očekávání také výraznější.	

3.6.4 Vzorek C210



Obr. 3-19 Vzorek C210.

Tab. 3-13 Měření vzorku C210.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	C210	[-]
materiál	PLA	[-]
nastavená teplota	210	[°C]
naměřená teplota	211	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	21,175	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	134,74	[μm]
slovní hodnocení	Vzorek C210 vypadá téměř totožně jako vzorek C200. Za zmínku stojí roztečení spodních vrstev do větší šíře, což způsobilo snížení výšky přibližně o jeden milimetr. Spodní stěna již obsahuje trhliny větších rozměrů. Drsnost povrchu je dalo by se říct obdobná s tou na etalonu.	

3.6.5 Vzorek C220



Obr. 3-20 Vzorek C220.

Tab. 3-14 Měření vzorku C220.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	C220	[-]
materiál	PLA	[-]
nastavená teplota	220	[°C]
naměřená teplota	221	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	20,806	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	89,024	[μm]
slovní hodnocení	Na kostce jsou patrné výstupky popsány u předešlých vzorků. Navíc se objevily bubliny, které v některých rozích narušují celistvost stěn. Drsnost se pohybuje stále na obdobné úrovni. Roztečení spodních vrstev již přesáhlo šířku 35 mm.	

3.6.6 Vzorek C230



Obr. 3-21 Vzorek C230.

Tab. 3-15 Měření vzorku C230.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	C230	[-]
materiál	PLA	[-]
nastavená teplota	230	[°C]
naměřená teplota	233	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	13,385	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	64,207	[μm]
slovní hodnocení	Vzorek C230 se svým tvarem vymyká. Místo výstupků pozorujeme propadení horních rohů, výrazný pokles výšky i roztečení do všech stran. Horní stěna se roztekla a vyhladila. Boční stěny jsou hladší, ale každá obsahuje několik rýh. Drsnost povrchu klesla skoro o polovinu.	

3.6.7 Vzorek C240

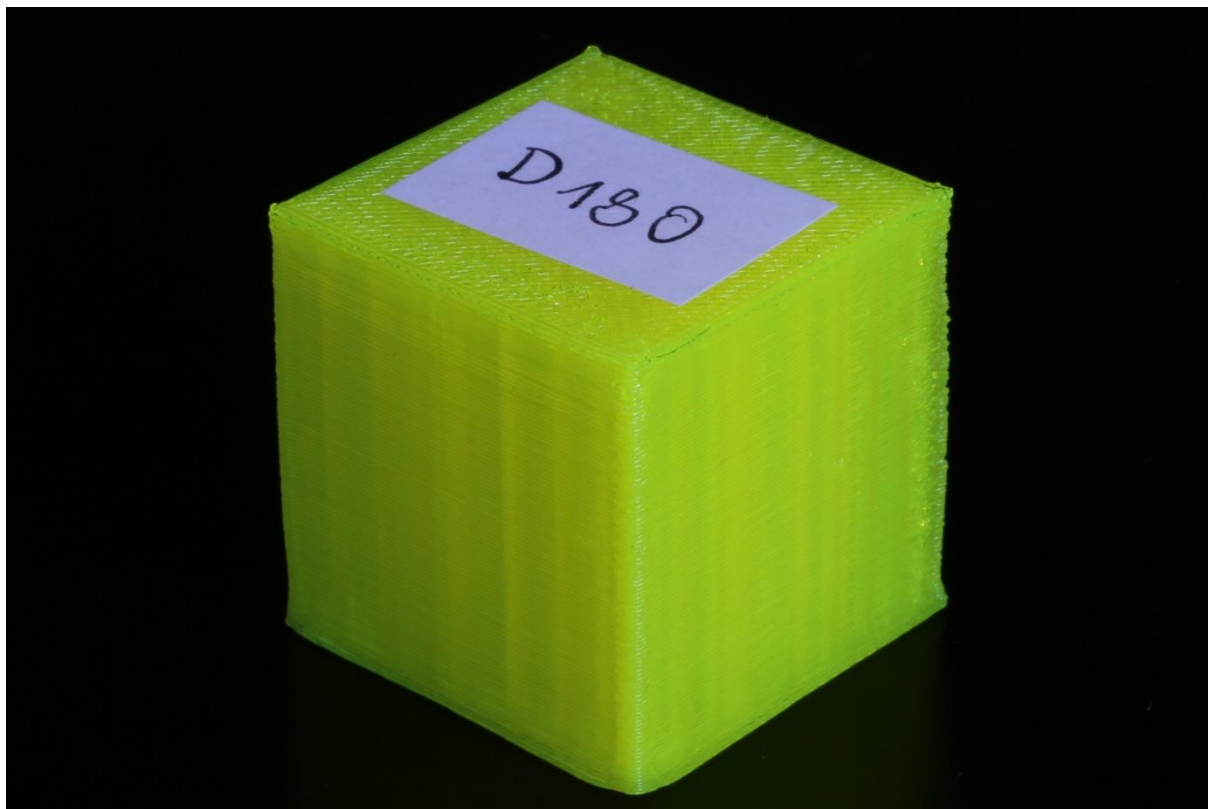


Obr. 3-22 Vzorek C240.

Tab. 3-16 Měření vzorku C240.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	C240	[-]
materiál	PLA	[-]
nastavená teplota	240	[°C]
naměřená teplota	245	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	6,435	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	38,491	[μm]
slovní hodnocení	Na vzorku jsou opět patrné výstupky. Ve dvou rozích můžeme dokonce vidět prasknutí bublin. Kostka je roztečená a zdeformovaná. Její povrch se ale zjemnil. V porovnání s etalonem dosahujeme zlepšení drsnosti povrchu o 70 %.	

3.6.8 Vzorek D180

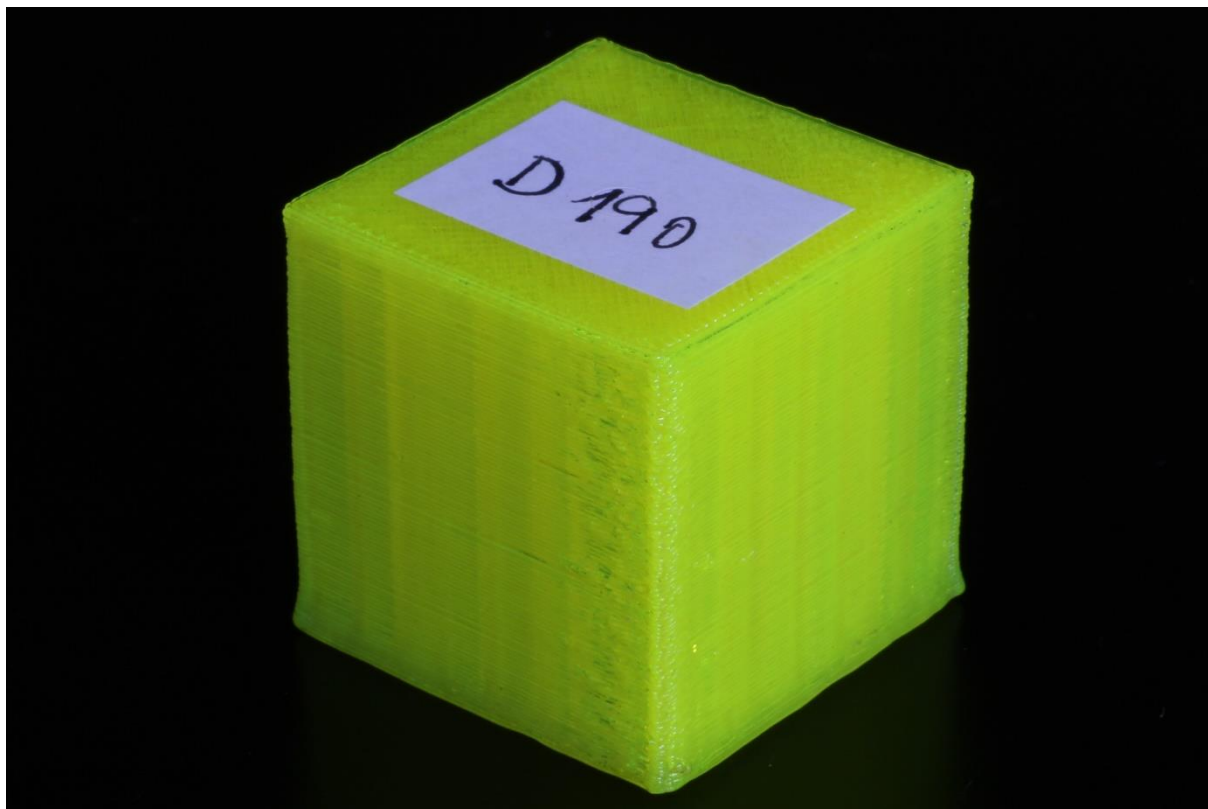


Obr. 3-23 Vzorek D180.

Tab. 3-17 Měření vzorku D180.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D180	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	180	[°C]
naměřená teplota	184	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	21,599	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	94,855	[μm]
slovní hodnocení	Kostka si díky velké teplotní rezervě do dosažení teploty tání materiálu zachovala svůj tvar i strukturu povrchu prakticky beze změny. Za zmínku stojí snad jen nepatrné roztečení několika spodních vrstev.	

3.6.9 Vzorek D190

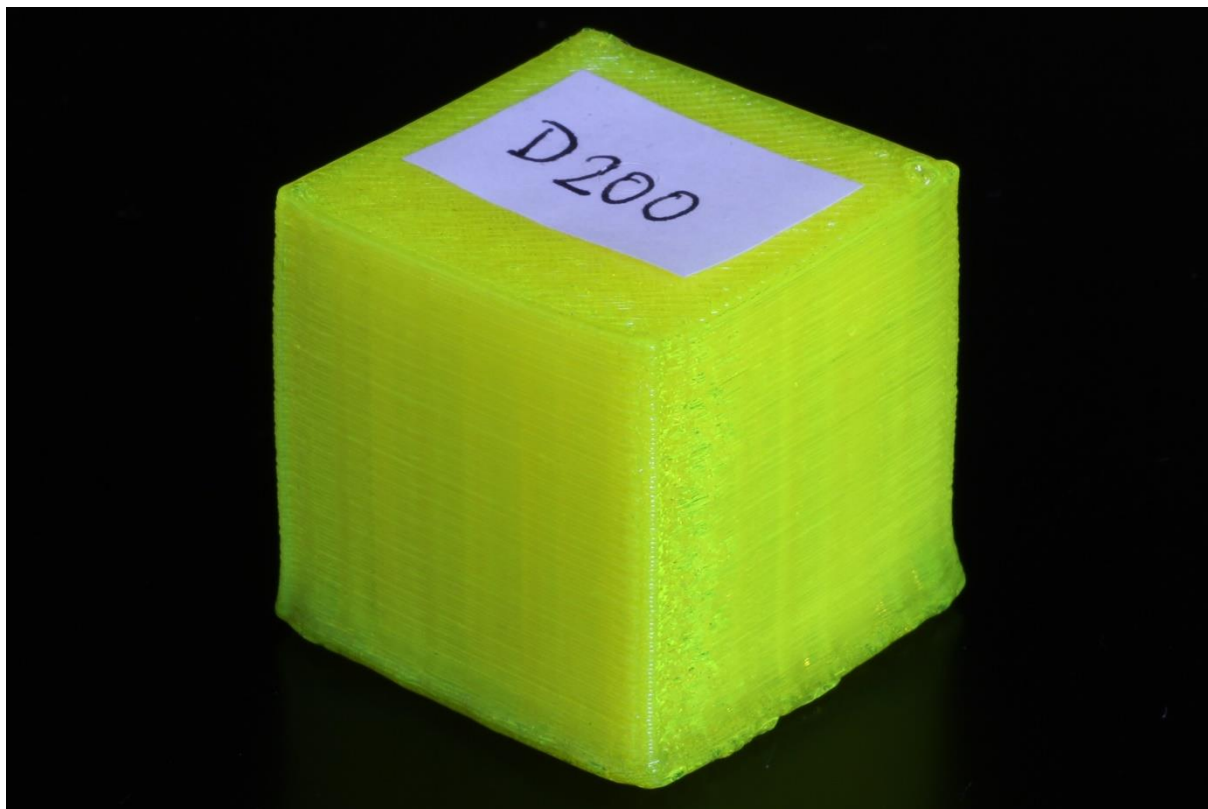


Obr. 3-24 Vzorek D190.

Tab. 3-18 Měření vzorku D190.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D190	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	190	[°C]
naměřená teplota	192	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	23,711	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	104,40	[μm]
slovní hodnocení	Výsledek experimentu po vystavení kostky teplotě 190 °C je prakticky stejný jako v předešlém případě. Podle výsledků měření má vzorek D190 trochu drsnější povrch než ten výchozí. Spodní stěna je lehce vyduta.	

3.6.10 Vzorek D200

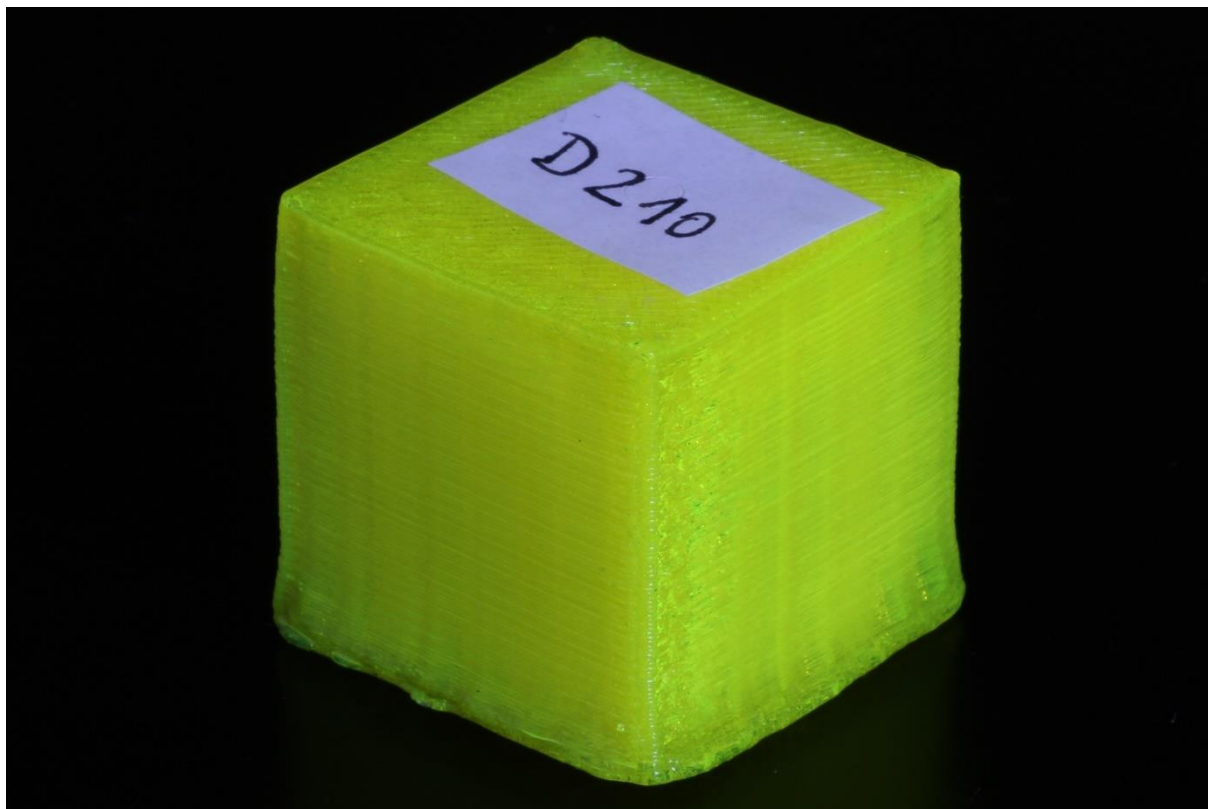


Obr. 3-25 Vzorek D200.

Tab. 3-19 Měření vzorku D200.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D200	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	200	[°C]
naměřená teplota	203	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	23,671	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	108,82	[μm]
slovní hodnocení	Teplota 200 °C způsobila drobné propadení horní stěny. Spodní stěna ztratila svou strukturu, vydula se a roztekla do stran. Hodnota drsnosti povrchu takéž převyšuje tu výchozí.	

3.6.11 Vzorek D210

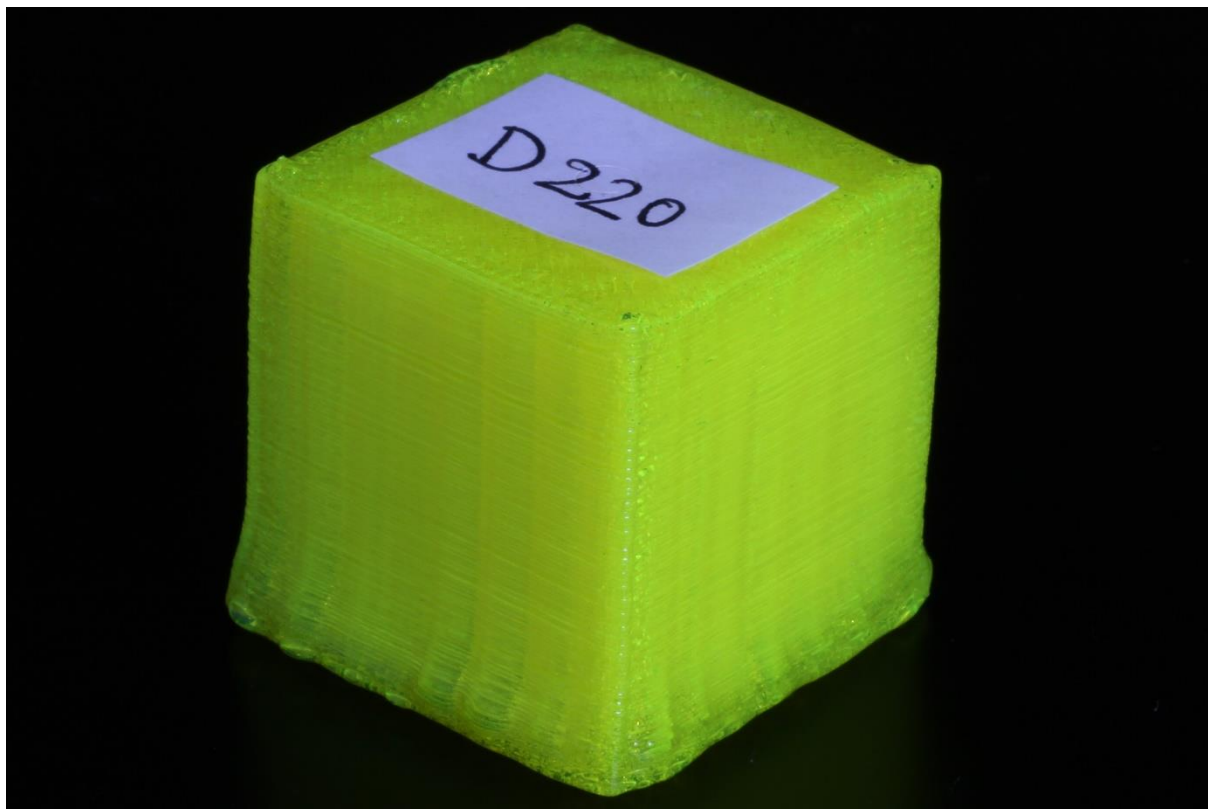


Obr. 3-26 Vzorek D210.

Tab. 3-20 Měření vzorku D210.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D210	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	210	[°C]
naměřená teplota	212	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	22,043	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	100,82	[μm]
slovní hodnocení	Výsledek experimentu u vzorků D200 a D210 je podobný. Trochu překvapivá je elevace jednoho rohu spodní stěny. Výsledek měření drsnosti dopadl o něco lépe než v předchozích dvou případech. Hodnota klesla nepatrně pod hodnotu drsnosti povrchu etalonu.	

3.6.12 Vzorek D220

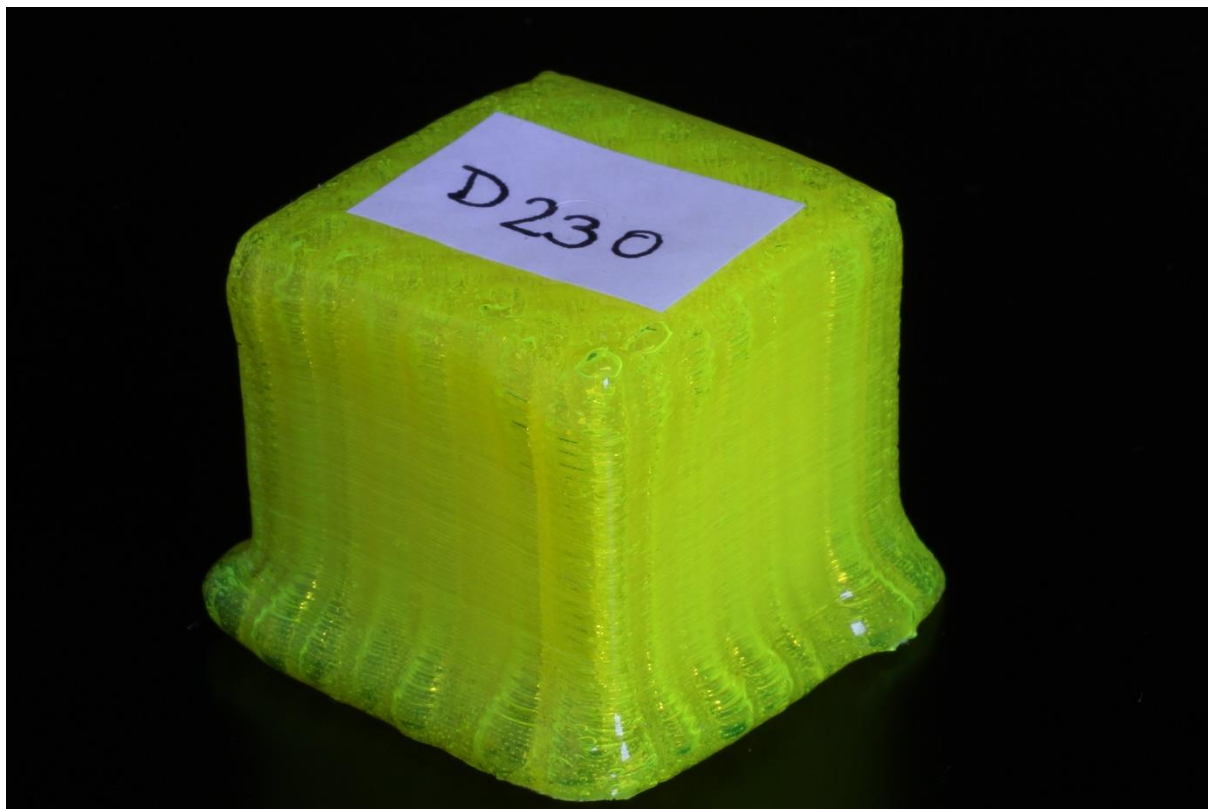


Obr. 3-27 Vzorek D220.

Tab. 3-21 Měření vzorku D220.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D220	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	220	[°C]
naměřená teplota	224	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	24,162	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	109,27	[μm]
slovní hodnocení	Na kostce jsou zaobleny horní rohy, na stěnách se objevují výstupky jako u materiálu PLA. Při pohledu zboku můžeme vidět náklon vzorku směrem dozadu. Roztečení spodních vrstev ještě není nijak výrazné. Drsnost povrchu vzorku se opět navýšila.	

3.6.13 Vzorek D230

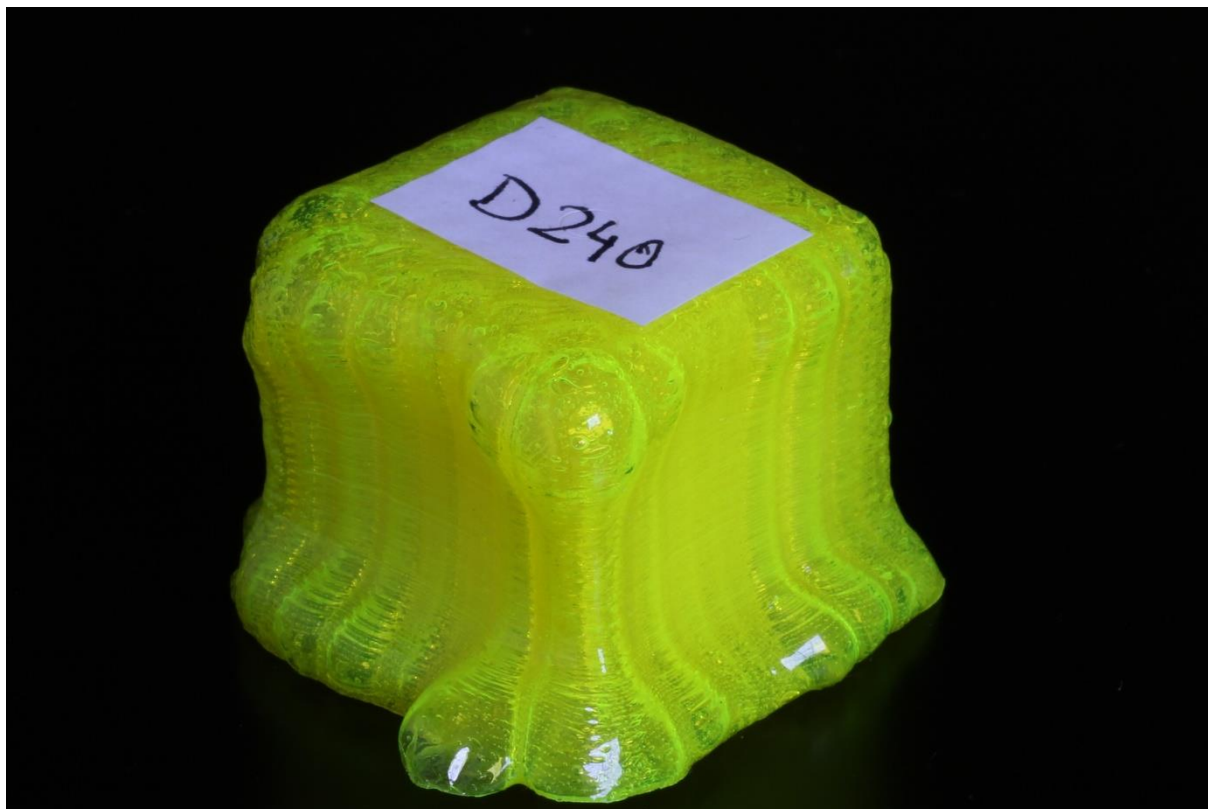


Obr. 3-28 Vzorek D230.

Tab. 3-22 Měření vzorku D230.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D230	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	230	[°C]
naměřená teplota	231	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	25,962	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	112,41	[μm]
slovní hodnocení	Výstupky se zvýšením teploty zvýraznily, v některých místech se začínají tvořit bubliny. Zajímavé je, že oproti materiálu PLA zde nedochází ani při teplotě 230 °C ke zúžení vzorku. Roztečení na spodu kostky je kompenzováno jen úbytkem na její výšce. D230 je první vzorek z PET-G, u kterého bylo poprvé přesáhnuto šířky spodních vrstev 35 mm. Hodnota drsnosti oproti minule ještě vzrostla.	

3.6.14 Vzorek D240

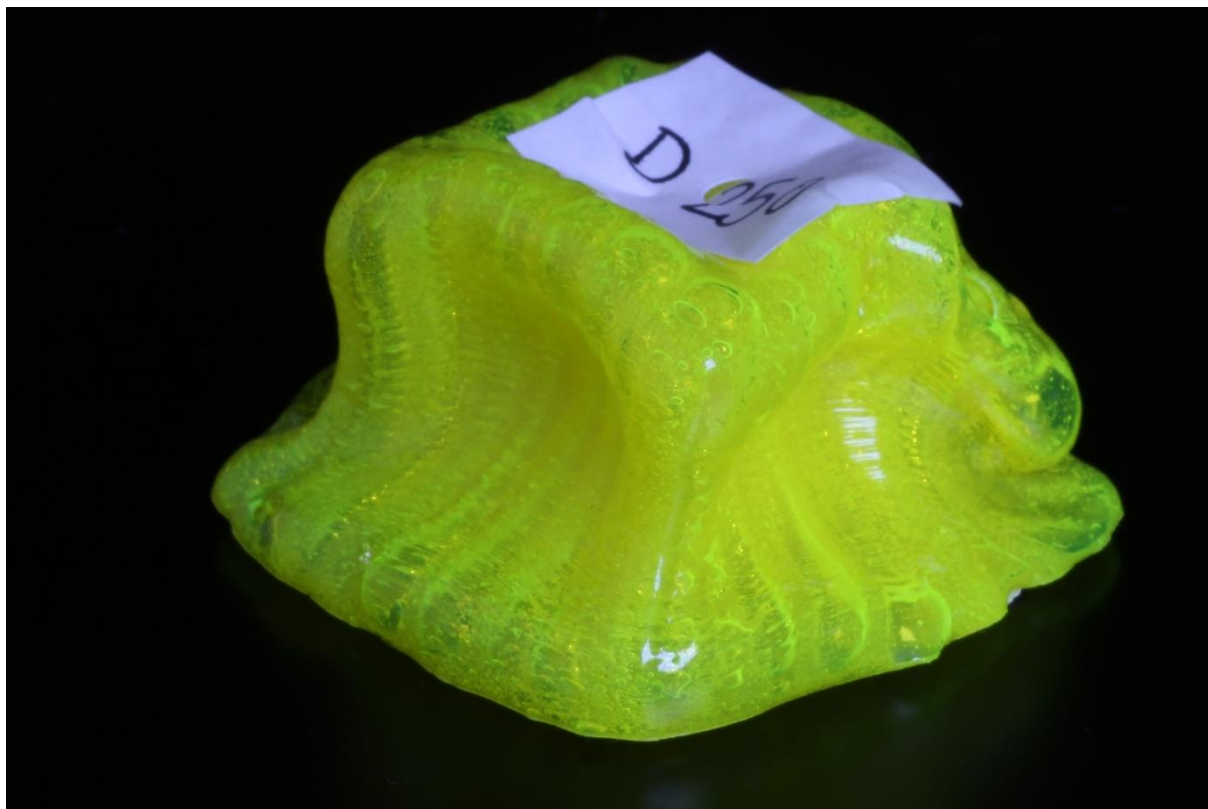


Obr. 3-29 Vzorek D240.

Tab. 3-23 Měření vzorku D240.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D240	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	240	[°C]
naměřená teplota	243	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	20,002	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	82,901	[μm]
slovní hodnocení	Při teplotě 240 °C došlo ke značné deformaci kostky. Jsou patrné výstupky, na vzorku se nachází řada bublin. Poklesla výška, vzorek se mírně zúžil, spodní vrstvy jsou nabobtnalé a roztečené. Drsnost povrchu poklesla pod hodnotu drsnosti u etalonu.	

3.6.15 Vzorek D250

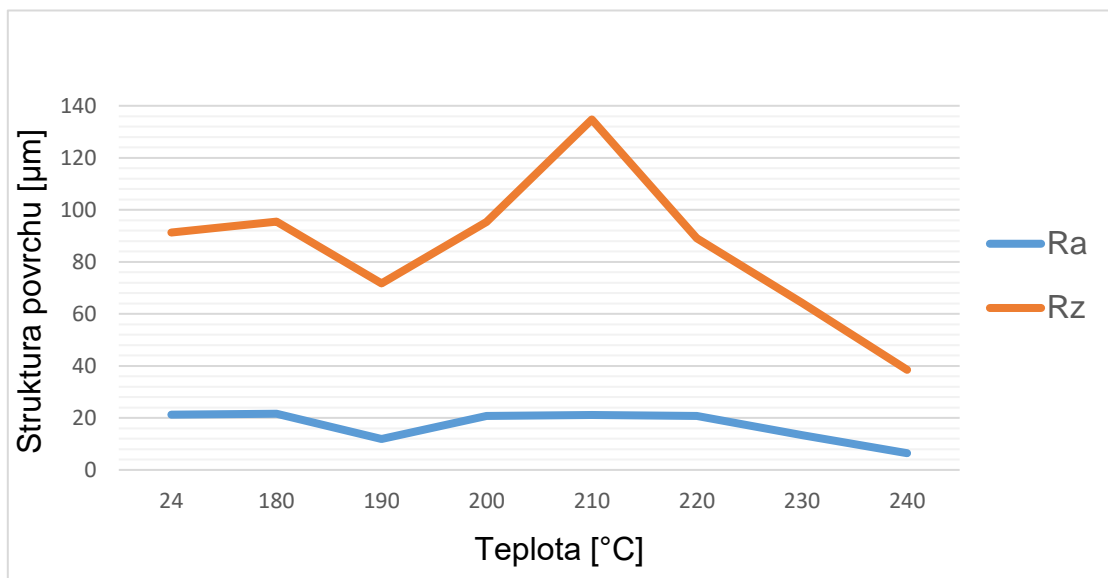


Obr. 3-30 Vzorek D250.

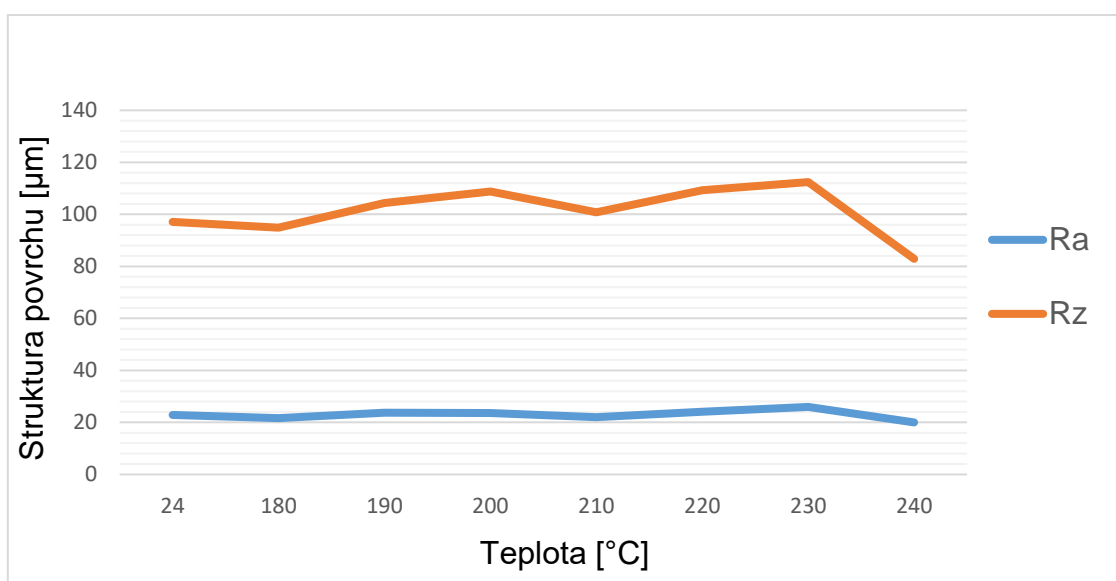
Tab. 3-24 Měření vzorku D250.

	Hodnota:	Jednotka:
vzorek	D250	[-]
materiál	PET-G	[-]
nastavená teplota	250	[°C]
naměřená teplota	256	[°C]
přesnost měření	$\pm (2 \% + 8)$	[°C]
doba působení	150	[s]
průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	neměřeno	[μm]
nejvyšší výška profilu Rz	neměřeno	[μm]
slovní hodnocení	Materiál se změknul a vzorek byl zdeformován. Můžeme vidět propadnutí horní stěny a boků. Je zde mnoho bublin, některé již prasknuté. Šíře spodní části přesahuje 40 mm. Drsnost povrchu kvůli deformaci tvaru nemohla být zjištěna.	

3.6.16 Výsledky experimentu 2



Obr. 3-31 Graf zobrazující změnu drsnosti povrchu - vzorky C.



Obr. 3-32 Graf zobrazující změnu drsnosti povrchu - vzorky D.

Od experimentu byla stejně jako v tom předchozím očekávána změna drsnosti povrchu. Předpoklad byl takový, že pokud ponecháme tištěný vzorek v prostředí s vysokou teplotou a zároveň nebude vystaven proudu vzduchu, získáme hladký a rovný povrch stěn. Navíc byl vystaven vysoké teplotě celý povrch vzorku, všechny stěny tak měly být vyhlazeny najednou.

Experiment ale dopadl jinak, než jsme očekávali. Změny drsnosti stěn vzorků pro oba materiály jsou znázorněny v grafech na obrázcích 3-31 a 3-32. U materiálu PLA

vidíme do teploty 220 °C prakticky neměnné hodnoty. Odskočená hodnota na vzorku C190 byla zřejmě náhodně naměřena na místě s jemnějším povrchem. Při vizuální kontrole se ale boční stěny vzorku jeví jako obdobně drsné a jejich povrch se v porovnání s ostatními vzorky nijak nevymyká. U vzorků C230 a C240 drsnost povrchu klesala. Optimismus nám ale bere fakt, že zmíněné teploty způsobily tavení materiálu v celém objemu a s tím spojenou deformaci jejich tvaru.

Materiál PET-G má průběh křivky znázorňující průměrnou aritmetickou úchylku profilu odlišnou. Nevidíme zde u žádného vzorku výrazně odskočenou hodnotu. Lehce překvapivé však bylo, že na některých vzorcích došlo naopak k mírnému zdrsnění jejich stěn. Pod hranici 20 μm jsme se nedostali ani u vzorku vystavenému teplotě 240 °C, což je pro tento materiál již v rozsahu hodnot doporučených pro jeho tisk. Kostka s označením D250 nemohla být změřena. Během experimentu byla totiž příliš zdeformována.

ZÁVĚR

Výsledky experimentů nedopadly podle očekávání. V tom prvním, kde bylo pro tepelné úpravy povrchu využito horkovzdušné pistole, jsme byli svědky chtěných změn ve struktuře povrchu tepelně ovlivněných stěn použitých vzorků. Na všech šesti vzorcích bylo dosaženo hladkého a lesklého povrchu. Doprovodným jevem ale bylo vtlačení stěn dovnitř kostek, jež má na svědomí proud vzduchu z pistole. Vzhled kostek tak neodpovídal našim představám o jejich konečné podobě a experiment proto považuji za neúspěšný.

Ve druhém experimentu byl vystaven vysoké teplotě celý povrch vzorků. Změny drsnosti jejich povrchů však nebyly téměř pozorovány. Výsledky měření drsnosti jednotlivých vzorků jsou zaznamenány v grafech, na nichž můžeme vidět, že hodnoty drsnosti povrchů leží přibližně ve stejné hladině. Výjimku tvoří vzorky z materiálu PLA nad teplotou 220 °C. Tam je již klesající tendence patrná. Stejně jako u prvního experimentu to ale nebyla jediná změna. Vysoká teplota způsobila změknutí materiálu kostek a deformaci jejich tvaru. S růstem teploty byly tyto deformace větší. V experimentu číslo dva tedy nebylo dosaženo snížení drsnosti povrchu vzorků do hladké a lesklé podoby. Navíc jsme docílili deformací v celém jejich objemu. Experiment tudíž hodnotím také jako neúspěšný.

Pokud vyjdeme z výsledků provedených experimentů, úpravou některých parametrů bychom snad mohli dosáhnout vytyčeného cíle. V prvním experimentu se povrch stěn vyhladil. Problémem byl silný proud vzduchu z horkovzdušné pistole. Řešením by tedy mohlo být nahrazení pistole hořákem. Tlak vzduchu by tak byl do velké míry eliminován. Ošleháním vzorku plamenem bychom tak mohli docílit jejich hladkého a lesklého povrchu. Doba by se tak z důvodu vysoké teploty zkrátila na jednotky sekund. Druhou možností je přiblížení vzorku k předmětu o vysoké teplotě sálající teplo. Kombinaci teploty předmětu, vzdálenosti od něj a doba, kterou by bylo nutno vzorek v jeho blízkosti ponechat, by pak bylo nutno zjistit. Modifikace druhého experimentu se mi nejeví jako možná.

U zhodnocení vhodnosti a využitelnosti metod v praxi začnu odzadu. Žádnou modifikaci metody použité v experimentu číslo dva zřejmě provést nelze. V praxi tedy její uplatnění neočekávám. Experiment číslo jedna nám ukázal, že tepelně upravit hodnotu drsnosti povrchu lze. Záleží na vhodné kombinaci použitého nástroje, teploty a doby působení na povrch tištěného objektu. Její využití je v praxi možné, ale málo pravděpodobné. Pro funkční prototypy je tato metoda nevhodná, protože v jejím průběhu může nastat změna jejich tvaru, navíc dosažení stejné hodnoty drsnosti na celém povrchu bude velmi obtížné. Časová náročnost předurčuje její využití jen v kusové výrobě. Uplatnění tak může nalézt kupříkladu u designérů nebo domácích kutilů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. Our Story | 3D Systems. *3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services | 3D Systems* [online]. Copyright © 2017 3D Systems, Inc. All rights reserved. [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
3. Úvodní stránka | KVS [online]. Copyright © [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf
4. FDM Technology, About Fused Deposition Modeling | Stratasys. *Stratasys/3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. Copyright © 2015. All rights reserved. See [stratasys.com](http://www.stratasys.com) [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
5. Our History of Invention | Stratasys. *Stratasys/3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. Copyright © 2015. All rights reserved. See [stratasys.com](http://www.stratasys.com) [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/i750/history>
6. Fused Deposition Modeling (FDM). *Manufacturing Cost Estimation* [online]. Copyright © 2017 CustomPartNet. All Rights Reserved. [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
7. FDM Technology, About Fused Deposition Modeling | Stratasys. *Stratasys/3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. Copyright © 2015. All rights reserved. See [stratasys.com](http://www.stratasys.com) [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
8. Fused filament. In: *Machine Design* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/sites/machinedesign.com/files/uploads/2015/04/Fused-filament.png>
9. MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
10. FDM Thermoplastics Material Overview | Stratasys. *Stratasys/3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. Copyright © 2015. All rights reserved. See [stratasys.com](http://www.stratasys.com) [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>
11. Seznam materiálů pro 3D tisk. *Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz* [online]. Copyright © Materialpro3d.cz, všechna práva vyhrazena [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>

-
12. 3D Matter. *3D Matter – Materials for 3D printing – comparison between PLA filament suppliers* [online]. Dostupné z: <http://my3dmatter.com/solutions/#materials>
 13. DAEKEON, Ahn, Kim HOCHAN a Lee SEOKHEE. 2008. Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology* [online]. Volume 209, Issue 2, January 2009 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608001763>
 14. K., THRIMURTHULU, PANDEY P. M. a REDDY N. V. 2004. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. Volume 44, Issue 6, May 2004, Pages 585–594. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503003262?np=y>
 15. Fused Deposition Modeling - Insights (PDF Download Available). *ResearchGate - Share and discover research* [online]. Copyright © 2014 Bonfring [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269702639_Fused_Deposition_Modeling_-_Insights
 16. MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.
 17. How to Smooth 3D-Printed Parts. *Machine Design* [online]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts>
 18. Finishing 3D Printed Parts | Stratasys. *Stratasys/3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. Copyright © 2015. All rights reserved. See [stratasys.com](http://www.stratasys.com/solutions/finishing-processes) [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/solutions/finishing-processes>
 19. BELL, Charles. *Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer* [online]. New York: Apress, 2014 [cit. 2017-05-24]. ISBN 978-1-4302-6808-6. Dostupné z: <http://www.springer.com/fr/book/9781430268093>
 20. *Stratasys 3D Printers & Technology for Business | AdvancedTek* [online]. Copyright © Ig [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: http://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2016/08/Best_Practice_-_Part_Dipping_-_Web_English_11-15.pdf
 21. Zahradník se baví | Máchání ABS v acetonu. *Zahradník se baví | To, co byste od zahradníka nikdy nečekali...* [online]. Copyright © 2017 [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.zahradniksebavi.cz/post/machani-abs-v-acetonu>
 22. Technická univerzita Liberec. Doplnkové technologie pro zpracování plastů. *Technologie II* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
-

-
23. ŠEVČÍK, I. Povrchové úpravy plastových dílů pro pokovování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.
24. RepRap [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap>
25. REBEL 3D • Portal. *REBEL 3D • Portal* [online]. Copyright © 2009 [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://www.rebelove.org/>
26. RepRap project. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_project
27. *REBEL 3D • Portal* [online]. Copyright © [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: http://www.rebelove.org/download/navod_rebel_ii_051.pdf
28. Arduino - Home. *Arduino - Home* [online]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
29. Repetier Software. - *Repetier Software* [online]. Copyright © 2017 [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <https://www.repetier.com/>
30. Novinky v rámci Inventoru. *Autodesk | Software pro 3D navrhování, projektování a zábavu* [online]. Copyright © 2017 Autodesk, Inc. Všechna práva vyhrazena. [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/campaigns/inventor>
31. Slic3r - G-code generator for 3D printers. *Slic3r - G-code generator for 3D printers* [online]. Dostupné z: <http://slic3r.org/>
32. Surftest SJ-210- Series 178-Portable Surface Roughness Tester. *Home Page* [online]. Copyright © 2017 Mitutoyo America Corporation. All rights reserved. [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://ecatalog.mitutoyo.com/Surftest-SJ-210-Series-178-Portable-Surface-Roughness-Tester-C1794.aspx>
33. ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. 1999.
34. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999.
35. NORTON, Robert L. *Cam design and manufacturing handbook*. New York: Industrial Press, 2002. ISBN 0-8311-3122-5.
36. MOAVENI, Saeed. *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, c2008. Pearson education international. ISBN 978-0-13-241651-1.
37. LAWRENCE, Kent L. *ANSYS workbench tutorial: structural & thermal analysis using the ANSYS workbench release 14 environment*. Mission: SDC Publications, 2012. ISBN 978-1-58503-754-4.
-

- 38.FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. *Autodesk Inventor: funkční navrhování v průmyslové praxi*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2007. Učebnice (Computer Press). ISBN 978-80-251-1773-6.
- 39.WANG, Wego. *Reverse engineering: technology of reinvention*. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-0630-2.
- 40.CHUA, Chee Kai. *Rapid prototyping: principles and applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. ISBN 978-981-277-897-0.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
3D	-	trojrozměrný
ABS	-	akrylonitril-butadien-styren
CAD	-	computer aided design – počítačem podporované navrhování
EEPROM	-	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - Elektronicky Vymazatelná Paměť pouze pro čtení
FDM	-	Fused Deposition Modeling - modelování nanášením taveniny
g-kód	-	název programovacího jazyka
M119	-	příkaz v g-kódu
PC	-	polycarbonate - polykarbonát
PET	-	polyetyléntereftalát
PLA	-	polylactic acid – kyselina polymléčná
Ra	-	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
RAMPS	-	RepRap Arduino Mega Pololu Shield - deska pro Arduino Mega, určená pro řízení 3D tiskárny RepRap
Reprap	-	replicating rapid prototyper - replikací k rychlému prototypování
Rz	-	největší výška profilu
stl	-	stereolitografie - souborový formát
USB	-	Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice